



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DE DIFERENTES TIPOS DE RECUPERAÇÃO EM VIGAS  
DE CONCRETO ARMADO COMPROMETIDAS PELO ESFORÇO DE  
CISALHAMENTO**

Marco Antônio Dall' Agnol

Lajeado, novembro de 2020

Marco Antônio Dall' Agnol

## **ANÁLISE DE DIFERENTES TIPOS DE RECUPERAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COMPROMETIDAS PELO ESFORÇO DE CISALHAMENTO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa Ma. Débora Pedroso Righi Köhler.

Lajeado, novembro de 2020.

Marco Antônio Dall' Agnol

## **ANÁLISE DE DIFERENTES TIPOS DE RECUPERAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COMPROMETIDAS PELO ESFORÇO DE CISALHAMENTO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Bruna Kuffner  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Orientadora:  
Profa. Ma. Débora Pedroso Righi Köhler  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, 03 de dezembro de 2020

## RESUMO

Com o aprimoramento das metodologias de dimensionamento do concreto armado, visando otimizar o consumo de matéria prima e construir estruturas cada vez mais esbeltas, se faz necessário um melhor controle desde o dimensionamento até a execução da estrutura. Sendo que qualquer equívoco ou defeito no material utilizado, por mínimo que seja, pode acarretar alguma falha grave na estrutura. Nesse contexto, o objetivo do estudo é avaliar o desempenho de diferentes reforços estruturais quanto ao esforço de cisalhamento em vigas de concreto armado, a fim de corrigir deficiências na estrutura de uma viga que está sendo acometida por esforço cisalhante, ou mesmo reforçar uma viga que terá uma mudança em sua solicitação. Para o estudo foram confeccionadas oito vigas de concreto armado e dez corpos de prova cilíndricos para avaliar a resistência do concreto. Duas vigas são para testemunho (VT) e o restante dividido em três grupos para os diferentes tipos de reforço, sendo as vigas de seção 100x15x10cm reforçadas com estribos argamassados (VREA), chapas metálicas (VRCM) e fibra de carbono (VRFC). As seis vigas que receberam o reforço sofreram pré-carga no ensaio de flexão a quatro pontos aos 14 dias de idade até atingirem seu Estado Limite de Serviço (ELS), sendo reforçadas em seguida, para aos 28 dias de idade serem submetidas novamente ao ensaio de flexão a quatro pontos, para desta vez atingirem seu Estado Limite Último (ELU). Os dados analisados sobre cada grupo de reforço/recuperação se referem ao grau de dificuldade de aplicação *in loco* e aos ganhos de resistência em relação ao grupo testemunho. Todos os reforços se mostraram eficazes na recuperação de vigas comprometidas ao esforço de cisalhamento. O grupo reforçado com fibra de carbono (VRFC) demonstrou a melhor performance quanto ao ELS, com um aumento de resistência ao cisalhamento de mais de 30%, em relação a completa ruína da viga de concreto armado. O grupo reforçado com chapa metálica (VRCM) levou ligeira vantagem sobre as demais, com um aumento de cerca de 20% ao ELU.

**Palavras-chave:** Reforço. Recuperação. Cisalhamento. Estribo argamassado. Chapa metálica. Fibra de carbono.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
1.1 Objetivos	7
1.1.1 Objetivo geral	7
1.1.2 Objetivos específicos	7
1.2 Justificativa da pesquisa	8
1.3 Estrutura do trabalho	8
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>10</b>
2.1 Concreto	10
2.1.1 Resistência mecânica	11
2.2 Aço	13
2.3 Concreto Armado	14
2.4 Fibra de carbono	14
2.4.1 Estrutura do Compósito de Fibra de Carbono	15
2.4.2 Propriedades	16
2.4.3 Aplicação em estruturas	17
2.5 Causas de deterioração de estruturas	18
2.5.1 Falhas no projeto	19
2.5.2 Falha de execução	20
2.5.3 Utilização inadequada e falta de manutenção	21
2.6 Degradação do concreto	22
2.7 Fissuração em estruturas de concreto armado	23
2.7.1 Fissuras por flexão em vigas	23
2.7.2 Fissuras por cisalhamento em vigas	24
2.7.3 Fissuras por torção em vigas	25
2.7.4 Fissuras por compressão em vigas	26
2.8 Técnicas de reforço estrutural	27
2.8.1 Reforço de polímero de fibra de carbono em vigas	28

2.8.2 Reforço com chapas metálicas em vigas	29
2.8.3 Reforço com argamassa de alto desempenho em vigas	30
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
3.1 Estratégia de pesquisa	32
3.2 Materiais	33
3.2.1 Cimento	34
3.2.2 Agregado miúdo	35
3.2.3 Agregado graúdo	36
3.2.4 Aço	37
3.2.5 Água	37
3.3 Dosagem do concreto	38
3.4 Dimensionamento das armaduras	42
3.5 Concretagem das vigas	44
3.6 Pré-Carga nas vigas	45
3.7 Recuperação das vigas	48
3.7.1 Reforço com Fibra de carbono	48
3.7.2 Reforço com Chapa de aço colada	50
3.7.3 Reforço com Estribos com argamassa	52
3.8 Ruptura	54
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>56</b>
4.1 Resultados de resistência a compressão do concreto/argamassa.	56
4.2 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Testemunho.	57
4.3 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Reforçado com Chapas Metálicas.	59
4.4 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Reforçado com Fibra de Carbono.	61
4.5 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Reforçado com Estribo Argamassado.	63
4.6 Comparação dos resultados dos grupos de vigas.	66
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos os profissionais da área de engenharia civil passaram a aumentar suas preocupações com a durabilidade e estabilidade de suas edificações, com essa preocupação houve uma evolução nos métodos de dimensionamento, o que permitiu a otimização das peças de concreto armado, e com essa otimização nos cálculos se permitiu a utilização de coeficientes de segurança menos conservadores. Esse maior conhecimento no dimensionamento, para Battisti (2017) teve como consequência um menor controle fiscal da execução por parte dos responsáveis técnicos.

Freitas (2014) frisa que manifestações patológicas não ocorrem apenas em edificações de idade avançada, edificações bem projetadas e executadas podem ter em seu interior algum material que teve um desempenho insatisfatório que pode acarretar diversas manifestações patológicas. Além, é claro, de alguma possível falha de execução ou projeto por parte dos trabalhadores em respectiva obra e uso inadequado da edificação.

Porém com o aprimoramento dos métodos de dimensionamento e construtivos, é possível analisar os problemas patológicos com grande exatidão a fim de propor soluções corretivas. Estas soluções corretivas também tiveram um grande desenvolvimento de métodos e aprimoramento dos mesmos, a fim de corrigir determinada patologia com a maior eficiência, num menor tempo, com menos mão de obra e melhor desempenho.

As técnicas de reabilitação e reforço estrutural de estruturas de concreto armado como dito por Battisti (2017), tem como objetivo restaurar as condições originais de uma estrutura danificada, ou prevenir, como o aumento da capacidade resistiva de um elemento que irá ter uma mudança de solicitação.

Nesse viés, esta monografia de conclusão de curso vem a apresentar três métodos distintos de recuperação ou reforço estrutural que serão empregados em vigas de concreto armado. Os reforços a serem utilizados nesta pesquisa serão o reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono, reforço com chapa de aço colada e aumento da seção da viga com estribos e argamassa de alto desempenho.

## **1.1 Objetivos**

Neste tópico serão apresentados os objetivos geral e específicos da pesquisa.

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o desempenho mecânico de diferentes métodos (fibra de carbono, chapas metálicas e estribos argamassados) para o reforço/recuperação de vigas de concreto armado.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

São os objetivos específicos:

- a) avaliar o desempenho mecânico de vigas de concreto armado;
- b) avaliar três tipos diferentes de reforços utilizados em vigas de concreto armado, avaliando o desempenho dos reforços quando aplicados a fim de resistir ao cisalhamento, sendo eles: fibra de carbono, chapas metálicas e estribos argamassados;
- c) avaliar a resistência a compressão do concreto utilizando corpos de prova cilíndricos de concreto;



- d) analisar o aumento de resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado após a realização do reforço estrutural;
- e) realizar um comparativo entre os reforços utilizando, determinando o reforço de melhor desempenho.

## **1.2 Justificativa da pesquisa**

Na construção civil são recorrentes as manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, tais como, fissuras por cisalhamento, flexão e deformação excessiva.

Essas manifestações patológicas podem ocorrer por diversos motivos, desde a falha de projeto até utilização inadequada da estrutura, por isso o interesse na pesquisa de meios corretivos a algumas destas situações.

O conhecimento pleno do porquê ocorre uma determinada patologia é fundamental para definir qual será o melhor método a ser utilizado a fim de sua correção.

Além de saber analisar corretamente a patologia, deve-se ser coerente na hora de decidir como intervir a fim de solucioná-la. Assim esta pesquisa busca estudar e ensaiar métodos de reforço estrutural em vigas de concreto armado, a fim de reforçar ou recuperar o elemento, para isto serão analisados diferentes métodos de reforço em vigas.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

A pesquisa presente neste trabalho está subdividida em cinco capítulos distintos, onde o capítulo 1 mostra os motivos que levaram ao interesse na pesquisa bem como os objetivos e justificativa a serem atingidos após a conclusão da mesma.

O capítulo 2 engloba toda a teoria da pesquisa, onde são mostradas as propriedades mecânicas do concreto e suas características, causas e tipos de

manifestações patológicas a que pode ser acometido, ainda contém diferentes técnicas para reforço estrutural que podem ser utilizadas para as correções.

O capítulo 3 demonstra a metodologia da pesquisa e como foram executados os ensaios relevantes para a pesquisa, bem como a caracterização de materiais e as técnicas de reforço estrutural.

Os capítulos 4 e 5, trazem os resultados obtidos após todos os elementos do estudo terem sido ensaiados e as conclusões após a realização do estudo, respectivamente.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta pesquisa bibliográfica, são abordados temas referentes ao concreto, como suas propriedades mecânicas, bem como seu uso em conjunto com o aço provendo o concreto armado. Ainda serão abordados temas como as diferentes manifestações patológicas ocorrentes no concreto armado, bem como suas origens. Além de técnicas de reforço estrutural por polímeros reforçado com fibra de carbono, uso de chapas metálicas e estribos argamassados.

### **2.1 Concreto**

Para se obter o concreto é preciso fazer a mistura de alguns elementos, sendo na maioria das vezes, o cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água. É possível acrescentar cinza volante, pozolanas, sílica ativa e outros materiais químicos. Tudo depende da finalidade a que se fará do concreto (COUTO et al, 2013).

É necessário compreender o comportamento mecânico do concreto como um todo pois baixa resistência mecânica pode acarretar em diferentes manifestações patológicas.

### 2.1.1 Resistência mecânica

Referente à resistência mecânica do concreto, é impossível não falar em sua resistência à compressão. Pinheiro et al. (2004) asseveram que a resistência à compressão é uma das principais propriedades mecânicas do concreto. Para determiná-la é preciso partir de ensaios, executados em condições próprias. Na maioria das vezes, os ensaios são feitos com as exigências de qualidade e atendimento às especificações. Estes são feitos em corpos de prova cilíndricos, com auxílio das normas regulamentadoras NBR 5738 e NBR 5739, com prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para Cristina et al. (2014), a resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) está diretamente relacionado com o tempo e qualidade da cura do concreto. Dessa forma, o item 8.2.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014), em relação à resistência, normatiza que quando não for indicada a idade, as resistências referem-se à idade de 28 dias.

Outra propriedade mecânica importante do concreto é a resistência à tração, que é dependente de vários fatores, dentre eles, o principal é a aderência dos grãos dos agregados com a argamassa (ALMEIDA, 2002). Para Battisti (2017), a resistência à tração pode ser obtida em ensaios laboratoriais, sendo os três mais utilizados: tração na flexão, tração direta e tração por compressão diametral.

Seguindo as colocações sobre a mecânica do concreto, nas palavras de Pacheco et al. (2014), módulo de elasticidade ou módulo de Young é a razão entre uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação imediata nele verificada. Quanto às normas que definem o módulo de elasticidade há que se lembrar que a ABNT traz em sua NBR 6118 as orientações necessárias para a compreensão do módulo em questão (PACHECO et al., 2014).

Battisti (2017) ressalta que em materiais heterogêneos, como o concreto, a parcela volumétrica, densidade e módulo de elasticidade de cada material são o que definem o comportamento elástico.

Ainda para Battisti (2017), a respeito das características de deformação do concreto, o concreto funciona como um sólido que, em seu interior, possui poros capilares capazes de abrigar ar ou até mesmo água. Caso esses vazios em seu interior estejam parcialmente preenchidos, o material pode se comportar de maneira que essas tensões capilares contribuam para as deformações.

Uma clara definição sobre fluência trazida por Pinheiro et al. (2004), onde, fluência se trata do acréscimo de deformação em uma peça de concreto que possui carregamento constante.

Essa deformação ocorre com mais intensidade nos primeiros meses da vida útil da estrutura. Porém, pode ocorrer em um prazo de até 10 anos e em estágios mais avançados os números são menores (MADUREIRA et al., 2013).

Logo, quando o concreto é carregado surge uma deformação instantânea, com uma acomodação dos cristais. Tal acomodação torna menor o diâmetro dos capilares e majora a pressão na água capilar, facilitando o fluxo em direção à superfície. Tanto um quanto o outro tornam maior a tensão superficial nos capilares, o que faz surgir a fluência (PINHEIRO et al., 2004).

Por fim, porém não menos importante, a durabilidade do concreto e de suas estruturas está diretamente relacionado ao seu meio.

O tempo de vida útil de uma estrutura de concreto, ou a durabilidade desta, segundo Battisti (2017) está condicionada aos agentes agressivos a que ela fica exposta durante seu uso.

A deterioração do concreto não tem causa somente externa, pode existir fatores internos no concreto, gerados por causa física, química ou mecânica (NEVILLE; BROOKS, 2010).

## 2.2 Aço

Segundo Pinheiro et al. (2010) o aço nasce da mistura de ferro carbono com silício, manganês, fósforo, enxofre etc, resultante da aniquilação total ou parcial de elementos desnecessários do produto, surgido na primeira redução do minério de ferro. Segundo o autor, o aço utilizado na construção civil tem em sua composição uma porcentagem de carbono da ordem de 0,18% a 0,25%.

Graças à ductilidade, incombustibilidade, facilidade de ser manuseado, resistência à tração, compressão, flexão e torção, resistência ao impacto, abrasão e desgaste é que o aço possui vasta utilização na engenharia (PINHEIRO et al., 2010).

A Figura 1 traz uma amostra do aço empregado no concreto armado.

Figura 1 - Aço utilizado na construção civil preparado para ensaio de tração



Fonte: Faria e Barreto (2019).

## 2.3 Concreto Armado

O concreto armado é a junção de concreto convencional com barras de aço. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 3), tem-se que os “elementos de concreto armado: Aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência.”

A utilização do concreto na construção exige atenção para sua qualidade, uma vez que esta depende das observações quanto às normas pré-estabelecidas, para que o módulo de elasticidade, resistência à compressão, trabalhabilidade e outras características venham a alcançar suas finalidades e, principalmente, a segurança estrutural, determinadas pelas normas atuais (RIBEIRO et al., 2016).

## 2.4 Fibra de carbono

Segundo Souza e Ripper (2009), o Japão foi o precursor do uso da fibra de carbono, em 1995, depois de abalos sísmicos, situação em que o país carecia reforçar as estruturas das construções do distrito de Kobe.

No que diz respeito de como se produzir a fibra de carbono sabe-se que é composta de três matérias-primas: *rayon*, poliacrilonitrila (PAN) e piche. São produzidas por meio da transformação por aquecimento de uma mistura em temperaturas entre 1000° e 3000° (SCHWARTZ, 1994).

Para Montanari e Gonçalves (2016), com estruturas desgastadas por causa tempo ou pelo ambiente externo, como em estádios/ginásios poliesportivos, a fibra de carbono recupera a capacidade portante e preserva a integridade da estrutura posteriormente. Conforme explica Battisti (2017), com base na fibra de carbono, é possível conceber mais de 100 modelos de compósitos reforçados com fibra de carbono.

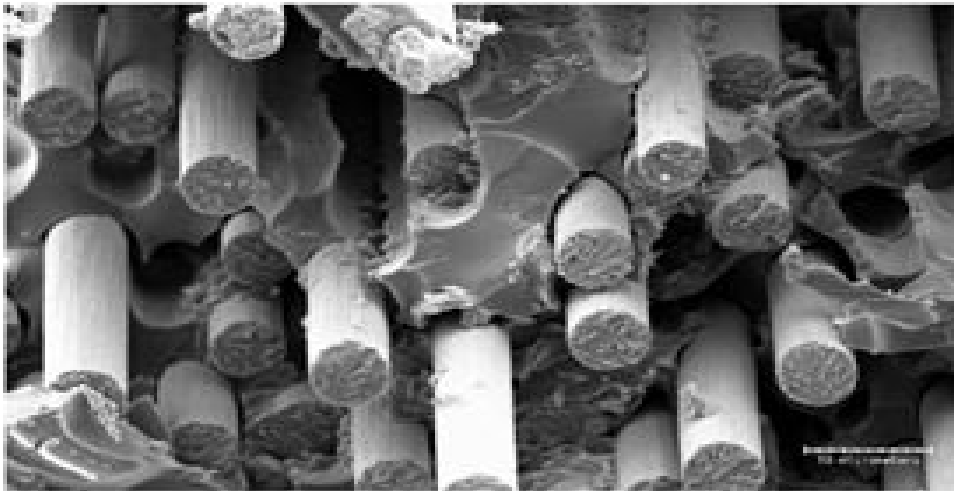
### 2.4.1 Estrutura do Compósito de Fibra de Carbono

Os materiais compósitos se dão pela utilização de dois, ou mais, materiais trabalhando de forma conjunta com o propósito de alcançar determinada propriedade a qual não seria possível com os mesmos isolados (MONTANARI; GONÇALVES, 2016).

Para Bronze (2016), os compósitos de fibra de carbono, são compostos por uma matriz polimérica e elemento estrutural (fibra de carbono). Machado (2010) diz que a matriz une as fibras e repassa os esforços externos às fibras, por meio das tensões tangenciais. Já o elemento estrutural tem a finalidade de reter as tensões de tração oriundas dos esforços solicitantes.

A Figura 2 ilustra o compósito de fibra de carbono aumentado num microscópio, enquanto a Figura 3 mostra a sequência de instalação do compósito para reforço estrutural sendo aplicado por dois profissionais.

Figura 2 - Ampliação em microscópio eletrônico de fibra de carbono



Fonte: Machado (2010).



Figura 3 - Aplicação de reforço em fibra de carbono



Fonte: Machado (2010).

#### **2.4.2 Propriedades**

Segundo Lawrence (2006), as fibras de carbono são materiais orgânicos, semi-cristalinos, constituídos, a um nível atômico, por cadeias bi dimensionais de átomos de carbono. O autor ainda afirma que devido à composição molecular as fibras de carbono apresentam um comportamento ortotrópico, sendo que as suas propriedades variam consoante a direção analisada.

A fibra de carbono, por sua vez, pode alcançar uma resistência superior ao aço. Para isso é preciso aplicar um tratamento especial na fibra básica, incluindo carbonização, grafitização e oxidação. Isso também pode resultar em várias configurações de resistência (BRONZE, 2016).

Segundo as observações de Bronze (2016), as principais características da fibra de carbono são o baixo peso, alta resistência e grande rigidez. Isso porque esse material tem sua base na força das ligações carbônicas no grafite no pouquíssimo peso do átomo de carbono.

Carvalho (2010) alerta que fibras de carbono podem ser arranjadas segundo duas características mais familiares, em diferentes grupos, com os principais sendo agrupados em função do módulo de elasticidade: padrão, elevado e ultra-auto.

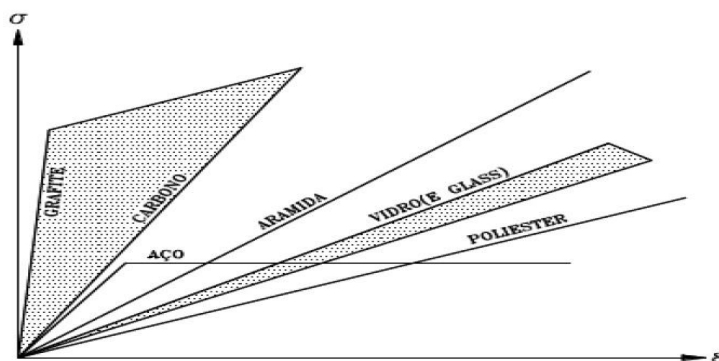
### 2.4.3 Aplicação em estruturas

Devido às suas excelentes propriedades mecânicas e aos reduzidos valores de peso específico (na ordem dos  $18 \text{ kN/m}^3$ ), as fibras de carbono são amplamente utilizadas em situações de reforço estrutural (MATTHYS, 2000). Na concepção de Carvalho (2010), devido à natureza inerte das fibras de carbono, o compósito possui imunidade à corrosão, grande resistência a substâncias ácidas, alcalina e orgânicas.

A fibra de carbono é muito utilizada na construção civil como reforço estrutural em lajes, pilares e vigas. O uso da fibra é usado como reforço quando os elementos antes citados estão degradados pois apresenta resistência a tração dez vezes maior que o aço (SERRA; SILVA, 2019).

A Figura 4 mostra o diagrama de tensão x deformação de alguns materiais utilizados na construção civil, onde pode se constatar que o carbono possui módulo de elasticidade maior que o aço, e seu comportamento elástico prevalece, chegando a limites maiores que o aço, inclusive com deformações inferiores.

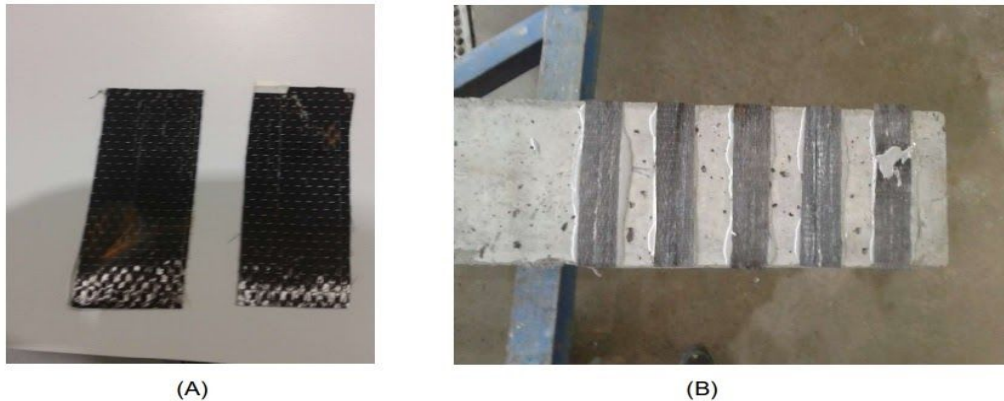
Figura 4 - Gráfico tensão x deformação comparando o aço com outros materiais



Fonte: Battisti (2017).

Para Souza e Vargas (2016), reforçar uma estrutura com fibra de carbono é rápido e as alterações de dimensão e peso dos elementos são desprezíveis, tornando-se uma ótima opção na reabilitação de estruturas. A Figura 5 demonstra como uma viga fica após ter recebido o reforço.

Figura 5 - Colagem: (A) Polímero com Fibra de Carbono; (B) Reforço em viga



Fonte: Souza e Vargas (2016).

Vale salientar que, é de suma importância repetir que a aplicação da fibra de carbono requer mão-de-obra qualificada, para que o resultado alcance as considerações presentes neste estudo.

## 2.5 Causas de deterioração de estruturas

Uma das maiores preocupações da engenharia civil é a questão da deterioração de estruturas, não só em virtude da segurança dos usuários, mas também por questões econômicas, dado que o reparo requer tempo e pode ser muito custoso.

Segundo Trindade (2015), a patologia pode surgir em qualquer uma das fases do concreto armado, por isso é de extrema importância tomar os devidos cuidados em todas as etapas, para que não aconteçam falhas.

Os fatores que dão origem à deterioração das estruturas do concreto são inúmeros, que vão desde a falha humana, no projeto ou execução, até a estrutura

química da composição dos materiais ou ações de agentes que agredem os materiais que compõem a estrutura de concreto. Resumindo, há motivos que dizem respeito ao teor do material, questões externas e questões físicas que acabam por deteriorar o concreto armado (TRINDADE, 2015).

É preciso estar atento a todos os componentes que envolvem a construção civil, a deterioração não tem uma única causa, uma vez que quando não se observa a eficiência, quer seja do material, do projeto, das manifestações do solo ou da própria natureza em si, esta se refere à falha humana.

### **2.5.1 Falhas no projeto**

Há falhas que tem suas causas na compreensão da estrutura, logo no início do projeto. O equívoco ocorre na elaboração do anteprojeto. Fazendo, assim, com que os resultados desastrosos possam ocorrer no projeto executivo (GONÇALVES, 2015).

A título de exemplo, usando as palavras de Couto et al. (2007), têm-se alguns resultados negativos, cujas causas tiveram suas origens ainda na etapa da elaboração do projeto. Como se observa:

- a) má definição das ações atuantes ou combinação mais desfavorável para a estrutura;
- b) deficiência na avaliação de resistências do solo, podendo levar, por exemplo, a recalques inesperados ao longo da construção e nos primeiros anos de vida da edificação;
- c) adoção de peças com espessura de cobrimento e relação água/cimento incompatíveis com tempo e as condições de exposição da estrutura;
- d) especificação inadequada de materiais;

- e) dimensionamento que leva a grandes deformações na estrutura, levando ao surgimento de fissuras (peças esbeltas e utilização de grandes vãos);
- f) utilização de juntas estruturais sujeitas à infiltração de água, próximas aos elementos estruturais;
- g) falta de compatibilização entre os projetos (arquitetônico, estrutural, hidrossanitário, elétrico, entre outros);
- h) detalhes construtivos impossíveis de serem executados.

Cabe ressaltar que o projeto dito com erro, é aquele que adota soluções incoerentes que fogem às normas e legislações dos procedimentos (MAYR, 2000).

### **2.5.2 Falha de execução**

Ao referir-se a tal assunto, MAYR (2000, p. 30), diz que “a falha de projeto induz ao erro de execução, comprometendo as características, a funcionalidade e o desempenho esperado do sistema edificado.”. O autor ainda alerta que “pode haver uma relação de causa e efeito entre a falha de projeto e o erro de execução já que a inconsistência das informações pode levar à não conformidade da obra.”

A respeito disso Takata (2009) afirma que o resultado da falha na execução da obra resulta em manifestações patológicas, bem como no caso de estruturas de concreto armado, onde aparecem trincas em vigas simplesmente porque não se adicionou barras de aço. Ou então trincas em elementos estruturais resultante do péssimo escoramento das formas.

Trindade (2015) apresenta exemplos de manifestações patológicas oriundas da falha executória do projeto: erros na concretagem, inconformidade nas armaduras, uso equivocado dos materiais de construção e até mesmo ausência de controle de qualidade. Quando se trata de falha de execução tem de lembrar que se refere à ação humana, dado que é o homem que faz a interpretação dos projetos.

Portanto, ao início de cada etapa executiva e durante sua execução, é imprescindível o acompanhamento do responsável técnico pelo empreendimento, a fim de minimizar o risco de falhas (DOLABELA; FERNANDES, 2014).

A Figura 6 exemplifica o que uma falha de concretagem pode acarretar em uma peça de concreto, deixando a armadura exposta à corrosão além da ausência de concreto em seções importantes.

Figura 6 - Falha em concretagem de viga



Fonte: Reganati (2019).

### **2.5.3 Utilização inadequada e falta de manutenção**

Cantarelli (2017) enfatiza que logo após a entrega do empreendimento se tem início a fase de uso, operação e manutenção.

A NBR 5674 (ABNT, 2012) é a norma que estabelece os requisitos para a gestão do sistema de manutenção de edificações. Segundo a norma, "a gestão do sistema de manutenção inclui meios para: a) preservar as características originais da edificação; b) prevenir a perda de desempenho decorrente da degradação dos seus sistemas, elementos ou componentes." (ABNT 2012, p. 3).

A patologia, nas edificações, estão atreladas ao projeto, a execução deste e podem aparecer em qualquer fase da obra, ou seja, no início, meio ou fim. Não

obstante podem aparecer também após vários anos de utilização do mesmo (SANTOS, 2014).

Outro aspecto levantado por Santos (2014) é que deve ser respeitado o correto uso a que a estrutura foi projetada, especialmente em termos de carregamentos e agentes possivelmente agressivos aos componentes estruturais.

Outro item de grande relevância a estrutura, é a manutenção desta. Problemas com patologia ocasionado por manutenção inadequada, ou pela falta de manutenção, têm sua origem no desconhecimento técnico, na incompetência e em problemas econômicos (SANTOS, 2014).

Para Brandão (1998) há vários fatores que contribuem para deterioração das estruturas e do concreto. Fatores esses que vão desde erros de projetos, erros de execução, uso inadequado dos materiais, má utilização da obra, fenômenos naturais, ausência de manutenção e principalmente da falta de controle de qualidade na construção civil.

## **2.6 Degradação do concreto**

Os fatores que levam à degradação do concreto armado são de duas ordens; internas e externas. Saber os motivos que levam a esse processo é de grande valia para que haja segurança na estrutura (SOUZA; RIPPER, 2009).

Para Lapa (2008) os meios mecânico, químico, físico biológico e eletromagnético são as principais causas de degradação do concreto.

Camargo (2017) frisa que a fissuração e deslocamento do concreto estão entre os principais sintomas em função de causas mecânicas. Este tópico será melhor abordado na próxima secção.

## **2.7 Fissuração em estruturas de concreto armado**

Essa manifestação patológica tem forte presença nas construções, principalmente no concreto armado. Na visão de Camargo (2017), a fissuração da estrutura ocorre por motivos como a variação de temperatura e umidade, carregamento excessivo e cristalização de sais nos poros.

No entanto, para saber as origens das fissuras primeiro é necessário classificá-las e saber quais são as suas configurações, para que se possa iniciar a recuperação ou o reforço das peças que apresentaram fissuras (CARMO, 2009).

Não esquecendo que a NBR 6118 (ABNT, 2014) traz os limites aceitáveis de fissuras para o quesito segurança da edificação. Segundo a norma, item 13.4.1, o surgimento de fissuras em concreto armado é inevitável, dado a baixa resistência a tração do concreto. E ainda relata no item 13.4.2 que desde que essas fissuras estejam dentro de parâmetros aceitáveis, não causam perda de durabilidade na estrutura.

### **2.7.1 Fissuras por flexão em vigas**

Helene (1992) diz que este tipo de fissura geralmente ocorre porque a peça foi subdimensionada, no caso, quando foi feita uma incorreta avaliação da carga atuante na estrutura. O autor, ainda ressalta que o erro na execução do projeto ou na utilização de materiais indevidos ou até mesmo a troca de estrutura podem causar fissuras devido à flexão. Essa manifestação patológica surge em virtude, nesses casos, das cargas acabarem sendo maiores do que as descritas no projeto.

O aparecimento dessas fissuras, em vigas de concreto, é denominada, por Trindade (2015), como manifestação patológica oriunda perpendicularmente às linhas de tração atuantes na peça. Nesse mesmo viés o autor ainda ressalta que a insuficiência da armadura e o aumento do esforço de tração levam a fissuras mais acentuadas.



Por causa da insuficiência de armadura, cuja responsabilidade é a resistência à tração, a deficiência pode ter surgido já na concepção do projeto ou na própria execução, seja por ação humana, quer seja por falta de informações ou mesmo negligência (TRINDADE, 2015).

Segundo o autor supracitado, as fissuras iniciam na zona tracionada desaparecendo na zona compressiva, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Fissuras por flexão.



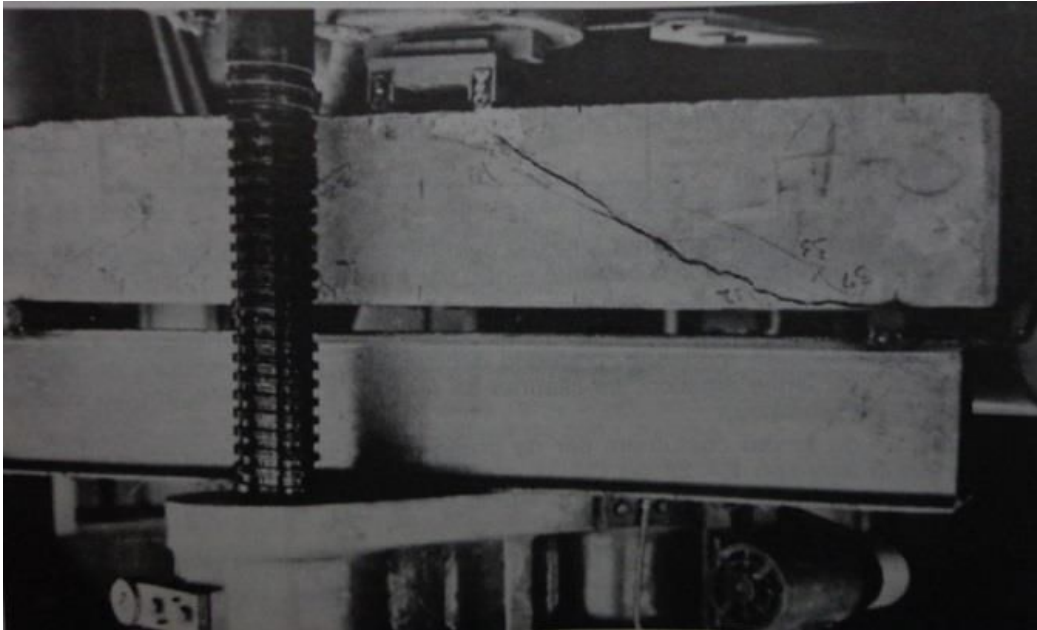
Fonte: Trindade (2015).

### **2.7.2 Fissuras por cisalhamento em vigas**

As fissuras por cisalhamento, oriundas do esforço cortante, são oblíquas e aparecem, na maioria das vezes, aos lado dos apoios. Porém, podem surgir, também na parte média das vigas. Essa manifestação patológica, geralmente, é resultado da não conformidade das armaduras de cisalhamento (VITÓRIO, 2003).

Fissuras de cisalhamento são caracterizadas por terem inclinação de  $30^\circ$  a  $45^\circ$  conforme NBR 6118 (ABNT, 2014), como a Figura 8 demonstra.

Figura 8 - Fissuras por cisalhamento.



Fonte: Trindade (2015).

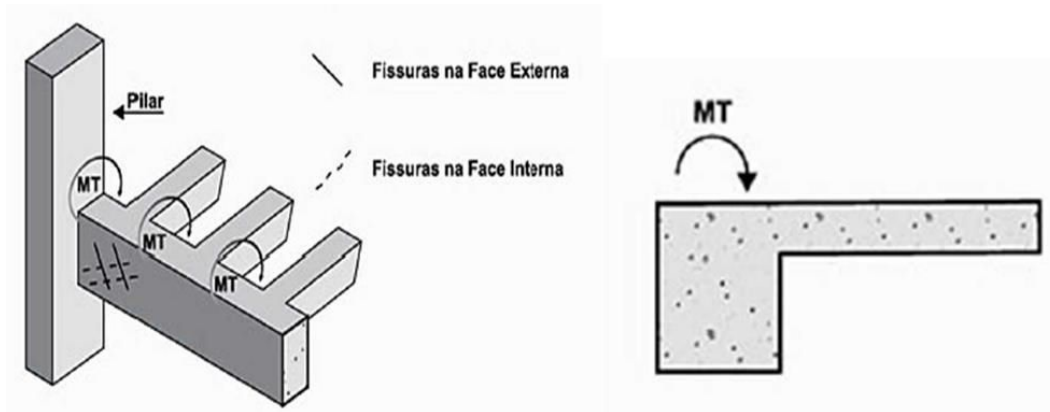
Por outro lado, estudos feitos por Muci et al. (2013) demonstram que quando há recalque de fundação, esse movimento introduz tensões de cisalhamento na estrutura e em alvenarias.

Cabe ressaltar que segundo Dolabela e Fernandes (2014), a fissuração resulta do esforço excessivo. Tais fissuras pendem-se próximas da armadura longitudinal. Em relação às de cisalhamento estas se desenvolvem paralelamente umas das outras, assim que vão aumentando em direção à borda comprimida.

### **2.7.3 Fissuras por torção em vigas**

Ao referir-se ao assunto Marcelli (2007) diz que uma peça de concreto é submetida a torção quando é submetida a uma rotação em relação a sua seção transversal. Visualmente estas fissuras são semelhantes às de cisalhamento, tendo um ângulo de  $45^\circ$  nas duas faces laterais da viga. A Figura 9 exemplifica como uma viga é submetida ao esforço de torção.

Figura 9 - Torção em viga e laje.



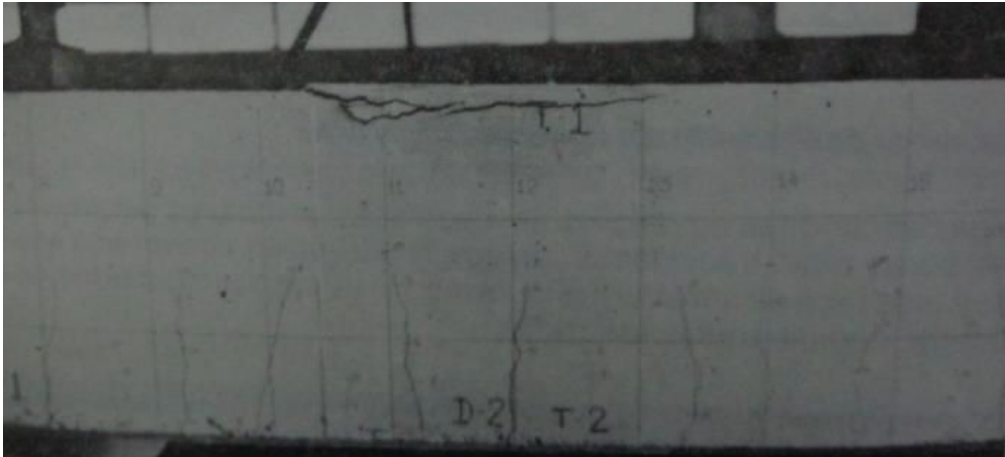
Fonte: Marcelli (2007).

Geralmente, vê-se que o concreto ainda não fissurado por torção trabalha em regime elástico-linear. Não obstante, depois da fissuração, o desempenho de um elemento de concreto é significativamente comprometido pela inclinação das fissuras (LIMA, 2002).

#### 2.7.4 Fissuras por compressão em vigas

As vigas em que o concreto não resiste à compressão, tem como sintoma o esmagamento do concreto paralelo ao eixo da viga na sua seção compressão. Estas fissuras são observadas com frequência em vigas densamente armadas, onde também é usado concreto com resistência inferior, surgindo trincas como mostrado na Figura 10 (TRINDADE, 2015).

Figura 10 - Esmagamento de concreto.



Fonte: Trindade (2015).

## 2.8 Técnicas de reforço estrutural

Reforçar uma estrutura é elevar o potencial dos elementos que a compõem, que por uma razão ou outra, degradou-se ou já nasceu em desconformidade, seja com o projeto inicial ou por falhas executivas.

Vale ressaltar que reforço é diferente de recuperação. Recuperação está atrelada a patologia do elemento estrutural, enquanto reforço diz respeito ao aumento da capacidade. Adorno et al. (2015, p. 18) esclarecem que “reforço é a intervenção em uma estrutura existente, aumentando sua capacidade resistente antes de atingir o seu estado-limite.” Por outro lado, os autores em comento, afirmam que “recuperação é o estabelecimento do uso e da segurança de uma estrutura previamente danificada.”.

No entanto, para que o resultado esperado aconteça é preciso analisar a estrutura que sofreu danificações, para só num segundo momento saber sua capacidade resistente, chegando-se assim às mais variadas possibilidades de reforçar a estrutura (ZUCCHI, 2015).

Os fatores que levam à necessidade de se fazer os reparos nas estruturas são inúmeros, que vão desde a modificação do uso, ampliação ou até mesmo por não ser viável demolir a construção (ZUCCHI, 2015).

No que tange à técnica adequada para o reforço estrutural, como já mencionado anteriormente, é muito relativo, dado que depende de inúmeros fatores. De antemão, cabe dizer que, este trabalho abordará apenas três técnicas de reforço, como se verá a seguir.

### **2.8.1 Reforço de polímero de fibra de carbono em vigas**

Para Battisti (2017), os sistemas estruturais que utilizam polímeros com fibra de carbono tem maior efetividade em termos de resistência, pois o polímero confere maior resistência a compressão e tração, bem como módulo de elasticidade semelhante ao aço.

Recomenda-se o reforço de polímero com fibra de carbono para todos os tipos de elementos estruturais, pois este acresce pouco peso à estrutura, possui alta resistência à tração e corrosão (ARQUEZ, 2010).

Nesse mesmo sentido, segundo estudos de Arquez (2010), os pontos positivos dessa técnica podem ser vistos durante a execução, uma vez que o aumento da carga permanente e espessuras são ínfimas, sem contar o curto tempo de paralisação e a rápida execução. Conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Reforço ao cisalhamento em viga com polímero com fibra de carbono.



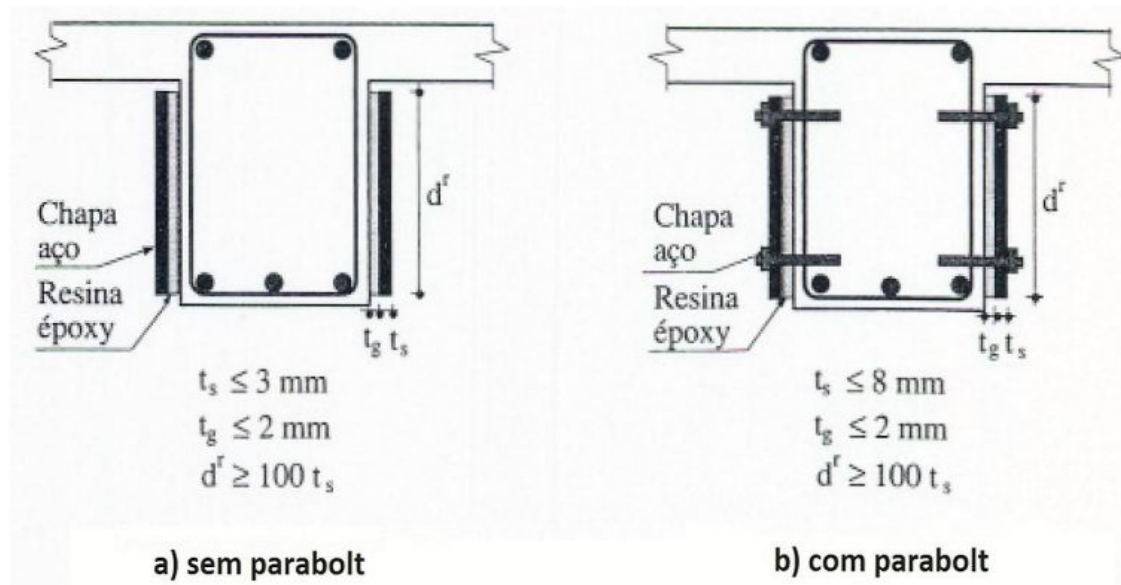
Fonte: INTECH (2018).

### 2.8.2 Reforço com chapas metálicas em vigas

A eficiência dessa técnica vem dos resultados positivos alcançados em inúmeras obras, onde foram empregadas a colagem de chapas metálicas, enquanto reforço estrutural (ADORNO et al., 2015).

Outras nomenclaturas também são utilizadas para o reforço com chapas metálicas, sem que sua técnica seja alterada. Zucchi (2015) chama esta técnica de adição de armadura exterior, onde chapas metálicas são coladas no exterior de peças de concreto com resina epóxi, ou também fixadas com auxílio de *parabolts*, como exemplificado na Figura 12 a seguir.

Figura 12 - Corte de vigas com reforço de chapa metálica.



Fonte: Zucchi (2015).

A chapa metálica pode ser fixada com o uso de resina e bucha expansiva, considerando que antes é preciso uma minuciosa preparação da superfície e da chapa, para que haja, assim, uma excelente ligação entre a chapa de aço de reforço e o elemento do concreto (MOURA, 2013).

### 2.8.3 Reforço com argamassa de alto desempenho em vigas

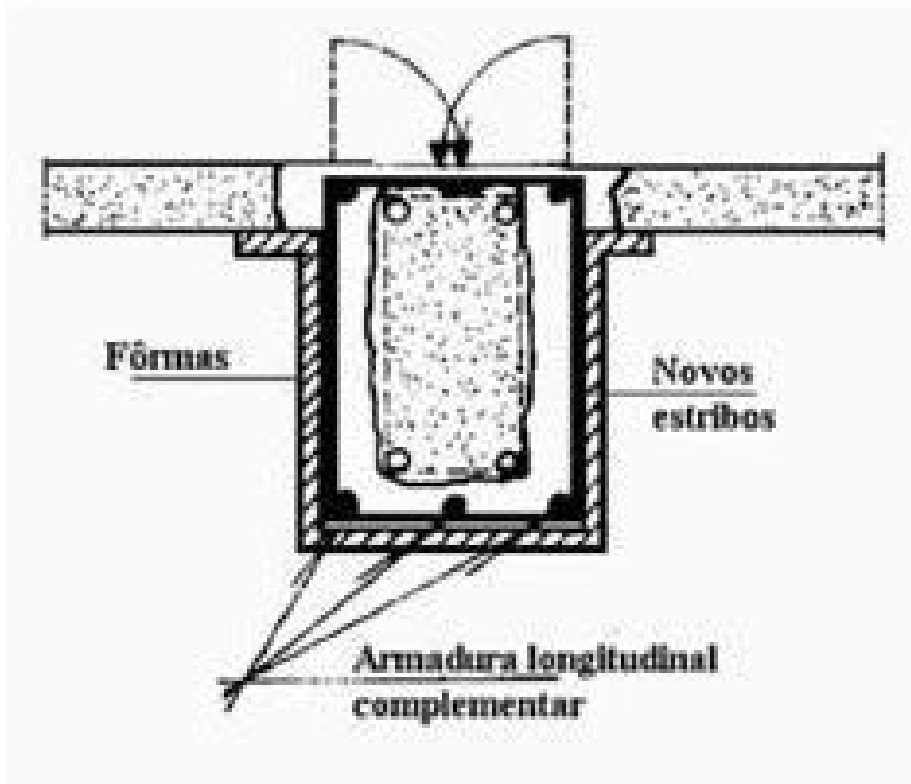
Esta técnica de reforço é mais utilizada em colunas devido não ser tão simples de ser executada, por ser feito uma concretagem em torno do elemento a ser reforçado.

Vaske et al. (2008) salientam que o sistema composto (peça existente + reforço) deve funcionar como um único elemento, isto ocorre quando é proporcionado a aderência ideal entre a peça e o reforço.

O princípio do reforço de pilares e vigas com esta técnica é o mesmo, abaixo a Figura 13 ilustra uma viga reforçada com argamassa de alto desempenho e adição

de armadura, também pode se ter uma breve noção da dificuldade de execução *in loco*.

Figura 13 - Reforço de viga com argamassa e adição de armadura.



Fonte: Bastos (2017).



### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente capítulo tem intuito de apresentar as características dos materiais e métodos que são propostos pelas normas regulamentadoras brasileiras que foram utilizados para atingir os objetivos desta pesquisa.

Cabe ressaltar que todos os ensaios de caracterização dos materiais foram feitos pela equipe de profissionais do LATEC da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES.

#### **3.1 Estratégia de pesquisa**

Como objetivo da pesquisa sugere, foi avaliado o desempenho de diferentes reforços para a armadura de cisalhamento em vigas. Os testes e ensaios foram realizados no LATEC da Univates.

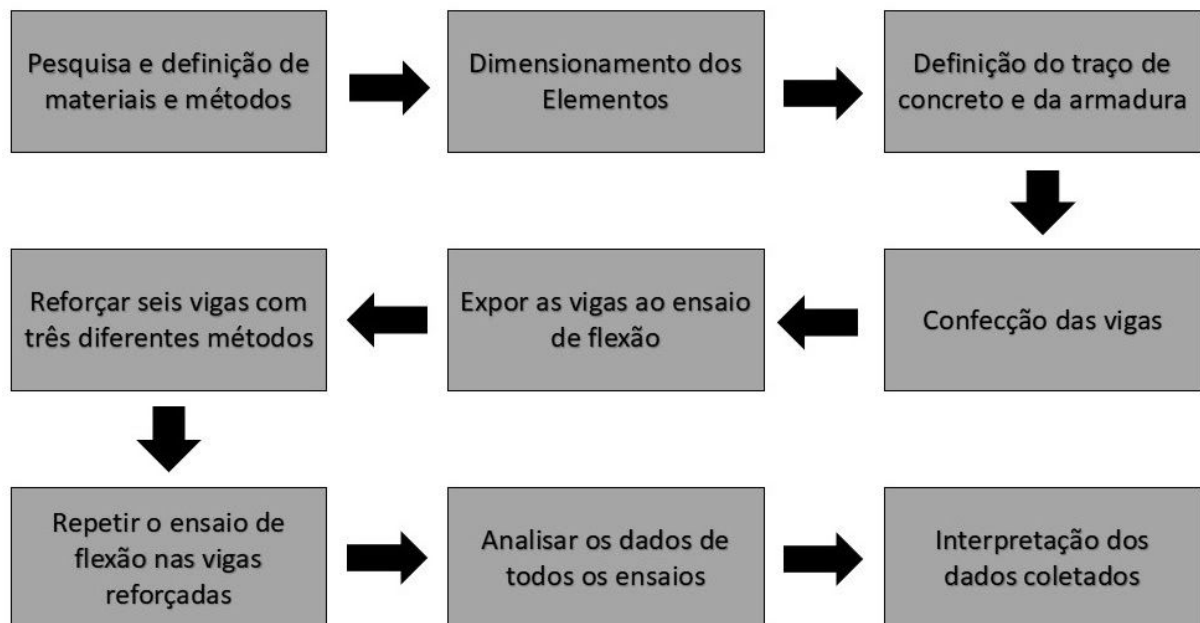
Na primeira etapa deste programa experimental foram confeccionadas oito vigas de seção retangular com dimensões de 10cm x 15cm e comprimento de 100cm. Estas vigas foram divididas em quatro grupos com duas amostras cada, sendo os grupos: Vigas Testemunho (VT), Vigas reforçadas de Fibra de Carbono (VRFC), Vigas reforçadas em Chapas Metálicas (VRCM) e Vigas reforçadas com Estribos Argamassados (VREA).

As vigas testemunho foram submetidas ao esforço de flexão a quatro pontos e ensaiadas até a sua ruptura total. Os outros três grupos de vigas, cada um com

seu respectivo reforço, primeiramente foram expostas ao ensaio de flexão sem quaisquer reforço, sendo aplicada uma pré-carga até sua fissuração no Estado Limite de Serviço (ELS), após isso elas receberam os três tipos de reforços. Posteriormente a este processo, elas foram novamente expostas ao ensaio de flexão até atingirem seu Estado Limite Último (ELU) a fim de avaliar o desempenho dos reforços.

A seguir é apresentado um fluxograma da pesquisa na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Do Autor.

### 3.2 Materiais

Nesta seção são apresentados os materiais que foram utilizados no desenvolvimento desta pesquisa, bem como o procedimento de caracterização dos mesmos.

Todos os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados pela equipe do LATEC da Univates.

### 3.2.1 Cimento

Para a confecção das vigas utilizadas na pesquisa, o material aglomerante utilizado foi o cimento Portland Pozolânico, o CP IV-32. Este aglomerante possui em sua composição de 15% a 50% de material pozolânico, por isto este cimento possui um menor calor de hidratação, além de ser menos permeável e atingir uma maior resistência à compressão num intervalo de tempo maior.

A Tabela 1 da NBR 5736 (ABNT, 1991) demonstra as propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland Pozolânico.

Tabela 1 - Propriedade mecânica CP IV

<b>Resistência à Compressão</b>	<b>Unidade</b>	<b>CP IV-25</b>	<b>CP IV-32</b>
3 dias de idade	MPa	>8	>10
7 dias de idade	MPa	>15	>20
28 dias de idade	MPa	>25	>32

Fonte: NBR 5736 adaptado pelo autor, baseado em ABNT (1991).

Também foi realizado o ensaio para a determinação da massa específica do CP IV-32, utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier, seguindo recomendações para o ensaio conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017).

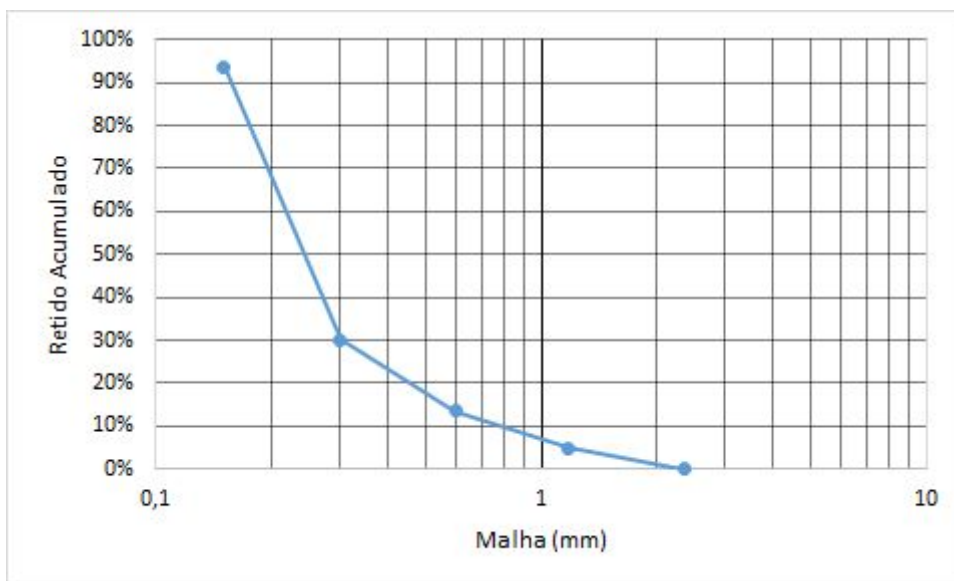
O ensaio basicamente consiste em encher o frasco de Le Chatelier com água entre os níveis de 0 cm<sup>3</sup> e 1 cm<sup>3</sup>, após é adicionado uma quantidade de 60g de cimento Portland que deverá elevar o nível do frasco dentre os níveis de 18 cm<sup>3</sup> e 24 cm<sup>3</sup>, com a coleta destes valores é possível determinar a massa específica do material (ABNT, 2017). A partir disso, a massa específica do CP-IV 32 encontrada foi de 2,72 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média, esta areia é a base de quartzo e é extraída de rios da região do Vale do Taquari e está disponibilizada pelo LATEC da Univates.

Para a determinação da granulometria da areia média, executou-se o ensaio de granulometria conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para o ensaio, foi separado uma amostra de 2 kg do material em estudo, após a pesagem da amostra ele é deixado por 24h em estufa, com temperatura de 105°C com variação de 5°C para mais ou para menos, a fim de retirar a umidade da amostra. Posteriormente a amostra passa pelas peneiras normatizadas pela NBR NM - ISSO 3310 - 1 ou 2. A Figura 15 apresenta a curva granulométrica obtida para a areia média.

Figura 15 - Gráfico com a curva granulométrica da Areia Média



Fonte: Do Autor.

A fim de obter-se a massa específica do agregado miúdo, é feito o ensaio descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2009), que faz uma relação da massa de areia seca pela diferença de volume do frasco e volume de água utilizado no ensaio, além da diferença de massa da areia seca entre a massa de areia saturada com superfície

seca pela massa específica da água. Através do ensaio se obteve o valor de 2,60 g/cm<sup>3</sup>.

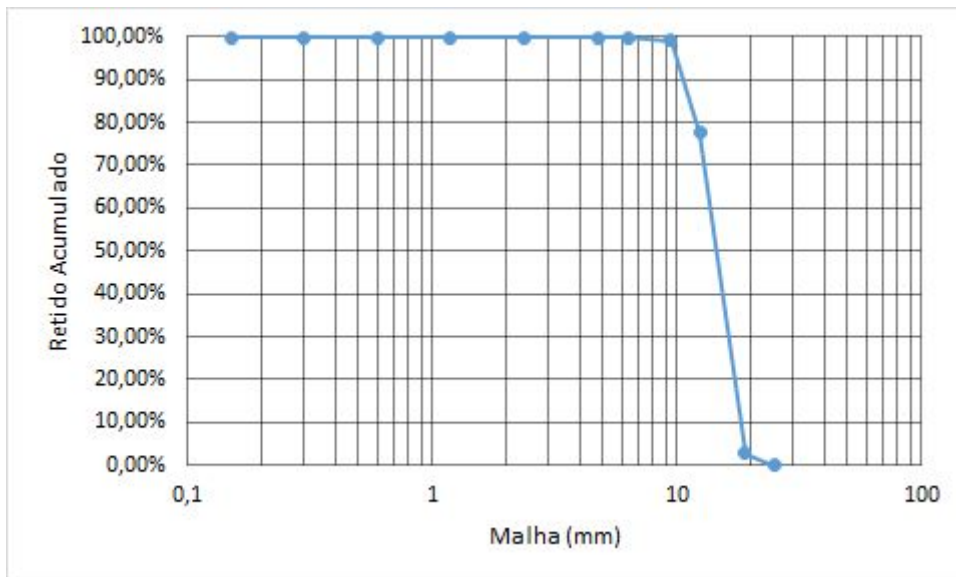
O ensaio para definição de massa unitária foi realizado seguindo o Método C, que conta na NM 45 (ABNT, 2006), onde um recipiente de massa conhecida é abastecido de agregado miúdo com uma concha até sua cota máxima para se obter a massa de areia que coube no recipiente, também deve ser feito o mesmo processo com água, para determinar o volume exato do recipiente. A água deve ter sua temperatura aferida para maior precisão no ensaio. Com equações da NM 45 (ABNT, 2006) é possível fazer relações com as massas aferidas e obter a massa unitária, que para o material em questão ficou em 1,492 g/cm<sup>3</sup>.

### **3.2.3 Agregado graúdo**

Para agregado graúdo optou-se por utilizar brita 1 de basalto, que é o agregado graúdo encontrado com mais facilidade no comércio. Para confirmar a classificação do agregado graúdo como brita 1 foi realizado o ensaio de granulometria segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio segue o mesmo roteiro do agregado miúdo.

A Figura 16 mostra a curva granulométrica para o agregado graúdo.

Figura 16 - Gráfico com a curva granulométrica da Brita 1



Fonte: Do Autor.

Com intuito de obter a massa específica do agregado gráúdo, o ensaio descrito na NBR NM 53 (ABNT, 2009) é feito conforme orientações nela descrita, o ensaio leva em consideração a massa do agregado gráúdo seco em estufa, sua massa saturado e sem água em excesso na superfície e sua massa submerso em água. Após o ensaio foi aferida uma massa específica para a brita 1 de  $2,95 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.2.4 Aço

As vigas do estudo foram elaboradas com a seguinte configuração: a armadura longitudinal será feita com aço CA-50 de 10,0mm de diâmetro e a armadura transversal será com aço CA-60 com 5,0mm de diâmetro. Os aços CA-50 e CA-60 suportam tensões de tração da ordem de 500 MPa e 600 MPa, respectivamente. Abaixo a Tabela 2 com dados do fabricante de vergalhões ArcelorMittal.

Tabela 2 - Propriedades do aço

<b>Propriedades do aço.</b>			
<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Massa (kg/m)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Diâmetro do pino para dobra</b>
5	0,154	600	6 x $\Phi$
8	0,395	500	5 x $\Phi$

Fonte: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos> adaptado pelo autor.

### 3.2.5 Água

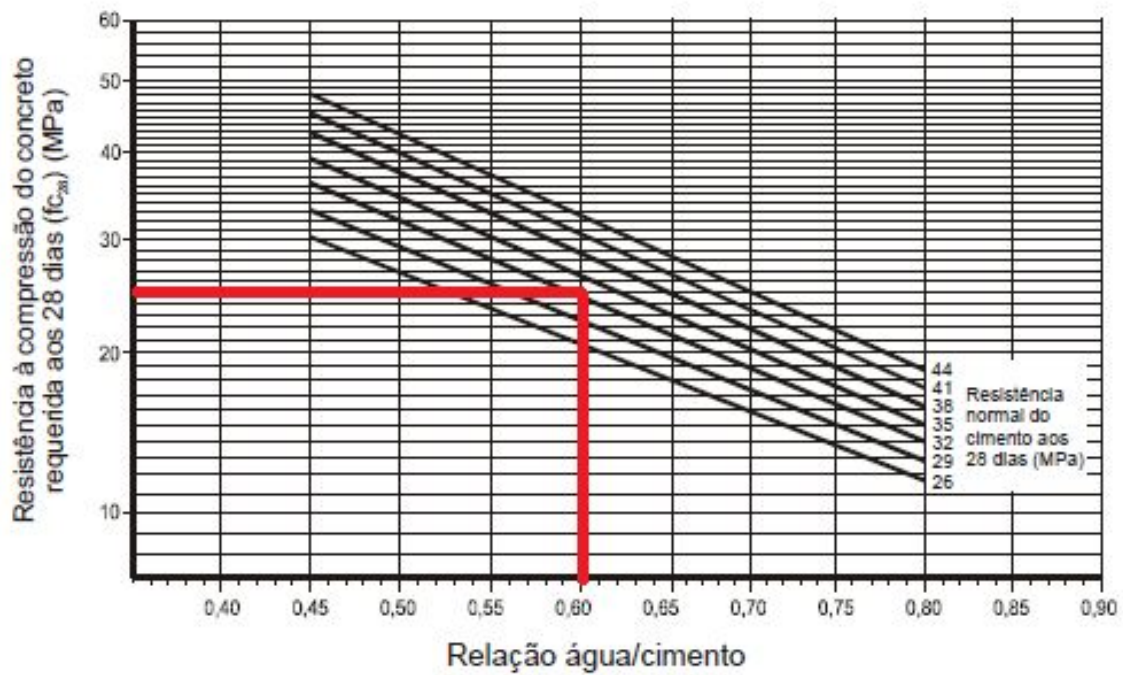
Um componente importante para a obtenção do concreto é a água que tem participação direta na qualidade do concreto, deve se ter cuidado com a relação de água/cimento utilizada na mistura, uma vez que, água em excesso deixa a mistura com menor resistência e a falta de água deixa o concreto com baixa trabalhabilidade. A água utilizada foi da rede de abastecimento Corsan.

### 3.3 Dosagem do concreto

O traço utilizado no estudo foi definido através do método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que é uma adaptação para os agregados brasileiros da American Concrete Institute (ACI). Neste processo de dosagem, com o auxílio de dados conhecidos como a resistência do Cimento Portland utilizado a 28 dias e a resistência do concreto esperada, também a 28 dias, é definido a relação a/c através da curva de Abrams .

Como espera-se obter uma mistura com  $F_{ck} = 25\text{MPa}$  a 28 dias, e sabendo que será utilizado CP IV-32, obteve-se o relação a/c = 0,60, conforme Figura 17.

Figura 17 - Tabela com relação a/c



Fonte: Boggio (2000).

A estimativa do consumo de água por  $\text{m}^3$  de concreto é definido em função do diâmetro máximo do agregado graúdo a ser utilizado e do abatimento almejado para a mistura, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo de água aproximado (Ca)

Abatimento (mm)	D <sub>máx</sub> do agregado graúdo (mm)				
	9,6	19,0	26,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Berton (2019) adaptado pelo autor.

A quantidade de cimento por  $\text{m}^3$  é obtida através da Equação 1.



$$C = Ca \div a/c \quad (1)$$

Onde:

C = quantidade de cimento por m<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>);

Ca = consumo de água (kg/m<sup>3</sup>);

a/c = relação água/cimento.

Para o uso de CP IV-32 com um abatimento entre 60mm e 80mm com o uso de brita 1, se obteve C = 333,34 kg/m<sup>3</sup>.

Para a estimativa do consumo de brita 1, que foi utilizado como agregado graúdo, utilizou-se a Equação 2.

$$C_p = V_{pc} * MU_c \quad (2)$$

Onde:

C<sub>p</sub> = consumo de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto (kg/m<sup>3</sup>);

V<sub>pc</sub> = volume compactado seco de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto;

MU<sub>c</sub> = massa unitária compactada de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto (kg/m<sup>3</sup>).

Sendo que o volume compactado seco de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto é obtido através da Tabela 4 utilizando-se o módulo de finura do agregado miúdo, que para a areia utilizada é de 1,4216.

Tabela 4 - Volume compactado seco ( $V_{pc}$ ) de agregado graúdo/ $m^3$  de concreto

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO ( $\Phi_{max}$ )				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

**OBSERVAÇÃO:**

1 – Os valores acima foram obtidos experimentalmente na Associação Brasileira de Cimento Portland.

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland.

Logo:

$$C_p = 0,81 * 1369 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1108,89 \text{ kg/m}^3$$

Para determinar o volume de agregado miúdo por  $m^3$  de concreto utiliza-se a Equação 3.

$$V_a = 1 - \left( \frac{C}{\gamma_c} + \frac{C_p}{\gamma_p} + \frac{C_{ag}}{\gamma_{ag}} \right) \quad (3)$$

Onde:

Va = volume de agregado miúdo por  $m^3$  de concreto; $\gamma_c$  = massa específica do cimento; $\gamma_p$  = massa específica do agregado graúdo; $\gamma_{ag}$  = massa específica da água.

Logo:

$$V_a = 1 - \left( \frac{333,34}{2720} + \frac{1108,89}{2950} + \frac{200}{1000} \right)$$

$$V_a = 0,3015$$

Com a definição do volume de agregado miúdo por m³ de concreto, pode-se usar a Equação 4 para determinar o consumo de agregado miúdo por m³ de concreto (Ca).

$$Ca = \gamma_a * V_a \quad (4)$$

Onde:

$\gamma_a$  = massa específica do agregado miúdo (kg/m³)

Logo:

$$Ca = 2600 \text{ kg/m}^3 * 0,3015$$

$$Ca = 784,04 \text{ kg/m}^3$$

Com a definição dos termos anteriormente apresentado, a Equação 5 faz a representação do traço, com relação ao unitário de cimento.

$$1 : \frac{Ca}{C} : \frac{Cp}{C} : (a/c) \quad (5)$$

Assim fica definido o traço do estudo, sendo 1 : 2,35 : 3,33 : 0,60, em massa, sendo 1 kg de cimento CP-IV 32 para 2,35 kg de areia média, 3,33 kg de brita 1 para 0,6 kg de água.

### 3.4 Dimensionamento das armaduras

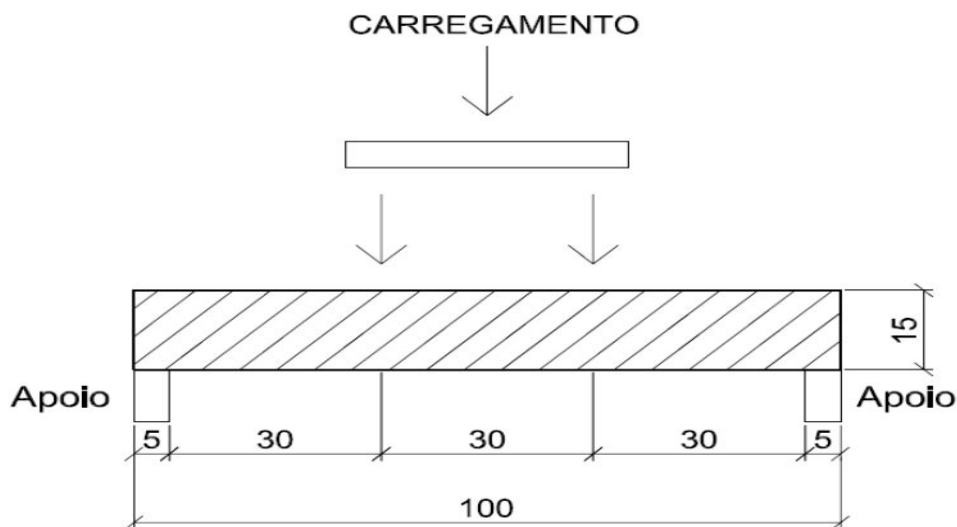
Como o presente estudo tem em seu foco a recuperação e reforço de vigas quanto ao cisalhamento, as vigas utilizadas no ensaio de flexão a quatro pontos

tiveram sua armadura longitudinal superdimensionada, esse superdimensionamento se deve ao fato de forçar a ruptura da peça por cisalhamento.

Seguindo esse raciocínio, as armaduras transversais foram utilizadas no limite mínimo, para induzir o surgimento de fissuras por cisalhamento durante o ensaio e posteriormente receberem os devidos reforços.

O dimensionamento das armaduras longitudinais e transversais que são apresentados no seguimento desta seção foram propostos por Battisti (2017) seguindo recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014). Para tal dimensionamento o autor citado leva em consideração no dimensionamento onde as cargas foram aplicadas no ensaio de flexão a quatro pontos, conforme a Figura 18 ilustra.

Figura 18 - Ilustração da carga no elemento



Fonte: Battisti (2017).

Além da definição da localização dos carregamentos, Battisti (2017) define outras condicionantes necessários ao dimensionamento, sendo eles:

a) seção das vigas: 10cm x 15cm;

b) cobrimento: 20mm adotado a partir de determinações da NBR 6118(ABNT, 2014), onde deve-se considerar um cobrimento nominal mínimo de 25 mm. Porém, caso haja controle adequado na execução, é permitido a redução dos cobrimentos nominais em 5 mm;

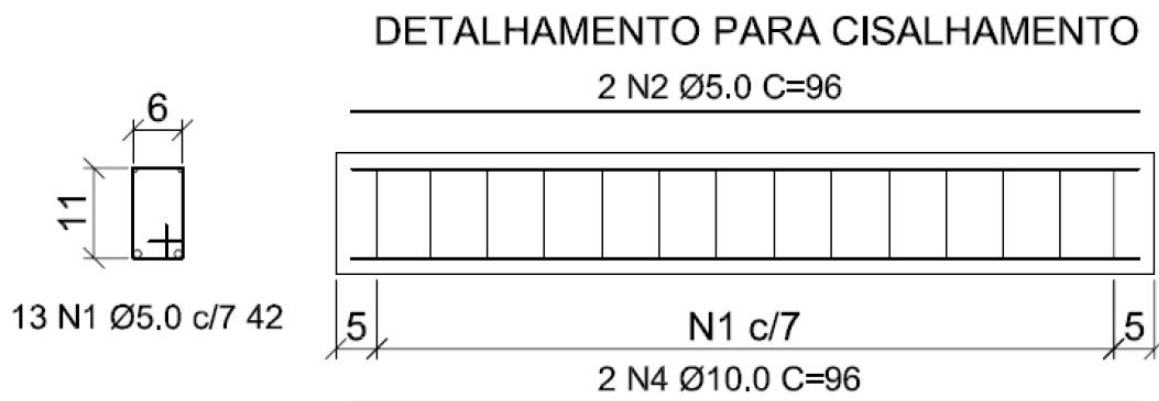
c)  $f_{ck}$  do concreto utilizado: 25 MPa;

d) aço na armadura longitudinal: CA-50;

e) aço na armadura transversal: CA-60.

Com as definições destes parâmetros, Battisti (2017) propõe a configuração de armadura exposta na Figura 19 para o ensaio das vigas ao cisalhamento.

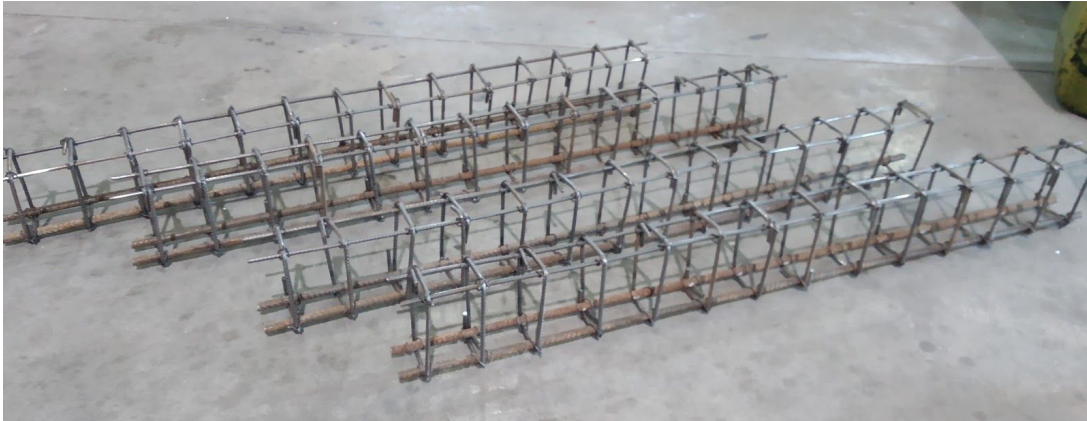
Figura 19 - Detalhamento de armadura para análise quanto ao cisalhamento



Fonte: Battisti (2017).

Com a definição da configuração de armadura a ser utilizada nas vigas, foram cortadas as quantidades de aço necessária, dobrado os estribos e feito a montagem com a amarração em arame recozido de 1,65 mm de diâmetro, a Figura 20 mostra a armadura pronta para a concretagem.

Figura 20 - Armadura do estudo finalizada



Fonte: Do Autor.

### 3.5 Concretagem das vigas

Posterior a finalização de todos os elementos necessários, como formas e armaduras, com o traço já definido, é executada a concretagem das oito vigas. Para tal procedimento foi utilizado um volume de  $0,14\text{m}^3$  de concreto.

A mistura do concreto foi feita manualmente em uma betoneira de queda livre com capacidade de  $0,25\text{m}^3$  de concreto. Para melhorar o processo de concretagem, que envolve a mistura do concreto em si, juntamente com o enchimento das fôrmas, adensamento do concreto com vibrador e acabamento, a concretagem será feita em duas etapas de  $0,07\text{m}^3$ , ou seja, serão concretadas quatro vigas e posteriormente mais quatro.

Quando finalizada a concretagem, as peças ficaram fora da câmara úmida até atingirem a resistência mínima para poderem ser desformadas e movimentadas, assim puderam ser levadas para a câmara com umidade 100% para a melhor cura possível do concreto.

A Figura 21 mostra os elementos a serem utilizados na pesquisa devidamente concretados, sendo oito vigas e dez corpos de prova.

Figura 21 - Elementos após concretagem



Fonte:Do Autor

### 3.6 Pré-Carga nas vigas

Considerando o intuito principal desta pesquisa, que é observar o comportamento de três tipos diferentes de material de reforço quanto ao cisalhamento em vigas, foram aplicadas pré-cargas em seis das vigas após 14 dias de cura.

A pré-carga foi feita em uma prensa de compressão, com o auxílio de suportes metálicos adaptados para tal ensaio, conforme Figura 22 abaixo.

Figura 22 - Prensa de compressão adaptada para o ensaio

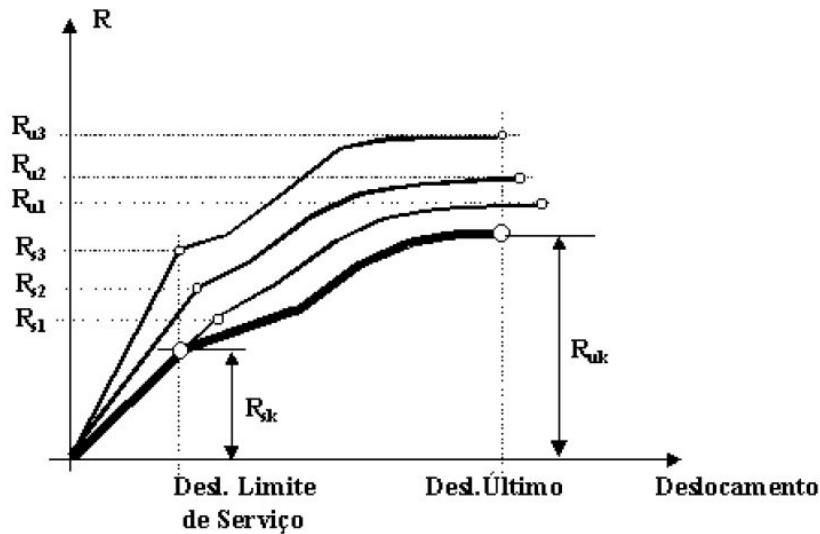


Fonte: Do Autor.

Após receberem um carregamento constante até atingirem seu ELS, ou seja, até as vigas demonstrarem grande quantidade de fissuras que demonstram que a peça está próxima de seu limite de utilização. Isso foi evidenciado quando as cargas demonstraram uma diminuição em seu aumento em relação ao deslocamento, conforme mostrado na Figura 23.



Figura 23 - Gráfico Tensão x Deformação de elementos ensaiados



Fonte: ABNT 15575-2 (2013).

As amostras de vigas pré-carregadas receberam marcações conforme Tabela 5 para melhor organização dos resultados a serem obtidos.

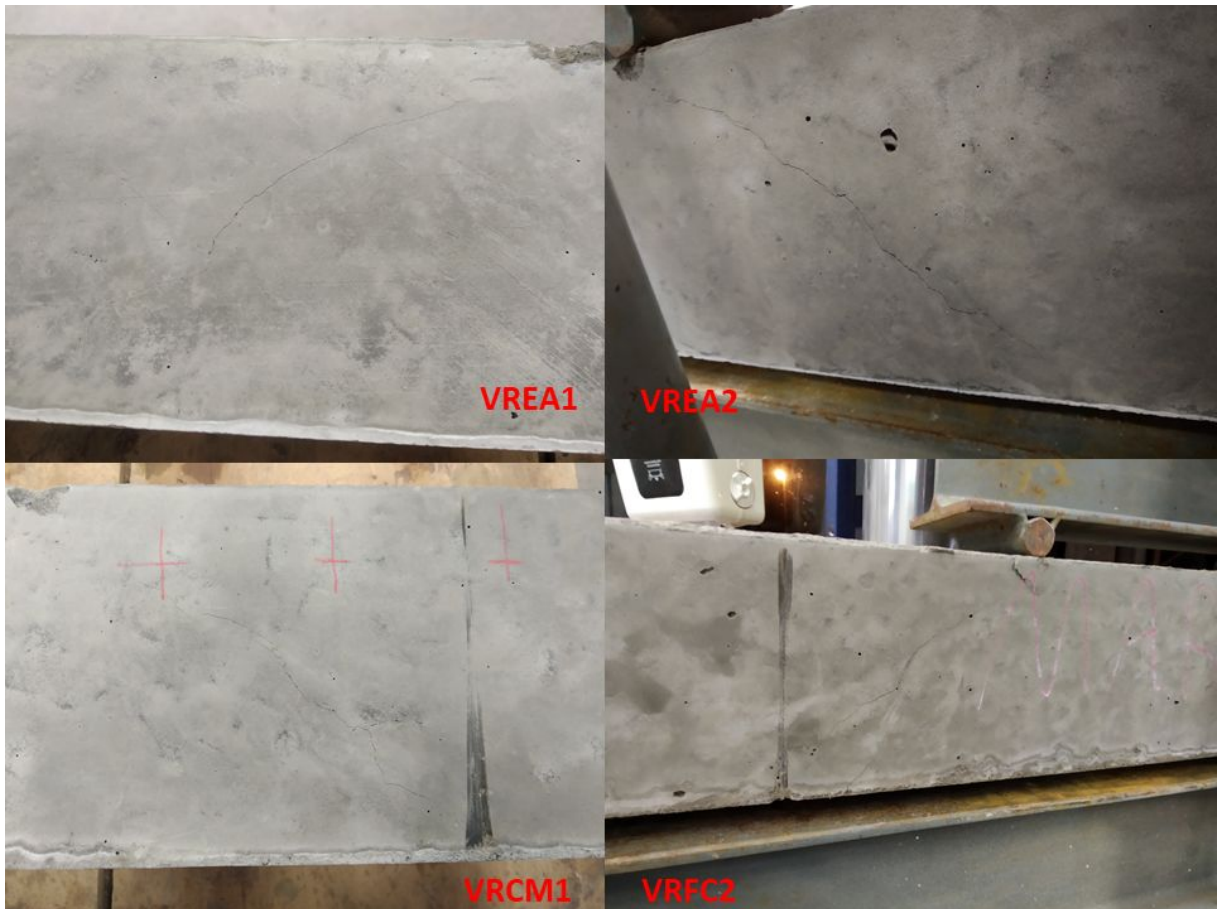
Tabela 5 - Denominações utilizadas para as vigas estudadas

Grupo de Vigas	Denominação adotada
Reforçado com Estribos Argamassado	VREA 1
	VREA 2
Reforçado com Chapa Metálica	VRCM 1
	VRCM 2
Reforçado com Fibra de Carbono	VRFC 1
	VRFC 2

Fonte: Do Autor.

A Figura 24, traz algumas fissuras de cisalhamento com inclinação próximas a 45° e de apoio a apoio, como eram esperadas após o pré-carregamento.

Figura 24 - Fissuras após pré-carga



Fonte: Do Autor.

### 3.7 Recuperação das vigas

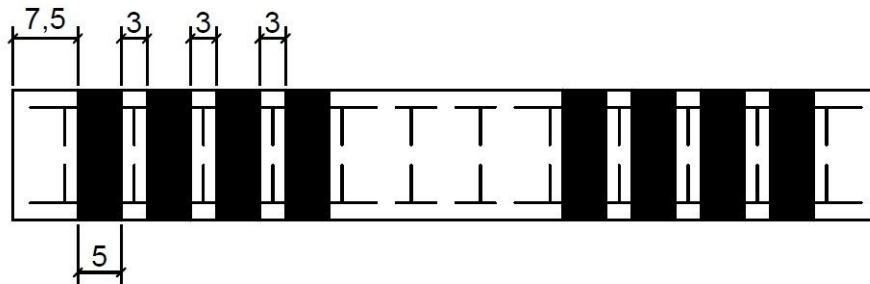
A seguir são aplicados três reforços em seis vigas, duas vigas para cada método de reforço, sendo eles, fibra de carbono, chapa de aço colada e estribos argamassados.

#### 3.7.1 Reforço com Fibra de carbono

O reforço de polímero com fibra de carbono foi aplicado em tiras de 5cm de largura por 15cm de altura, aplicadas entre dois estribos de aço. Foram utilizadas 32

lâminas de fibra de carbono para cada viga, sendo aplicadas como no esquema da Figura 25, havendo sobreposição das mesmas.

Figura 25 - Detalhamento reforço com fibra de carbono



Fonte: Do Autor.

Para a devida aplicação do polímero, segundo Menon e Padaratz (2014), o procedimento inicia com a abertura de ranhuras com esmerilhadeira onde o polímero será aplicado a fim de aumentar a aderência entre o adesivo e a viga, caso haja reboco ele deve ser completamente removido. Em seguida deve ser feito uma excelente limpeza com jatos de ar para completa remoção de impurezas do local onde será aplicado o adesivo epóxi. Logo em seguida, é aplicado o polímero com fibra de carbono para a colagem.

Após a secagem inicial da resina desta primeira etapa, que levou em torno de 1 hora, é aplicado mais uma camada de resina epóxi para a colagem de mais uma tira do polímero.

A Figura 26 a seguir demonstra a viga VRFC com seu processo de reforço já finalizado.

Figura 26 - VRFC com reforço finalizado



Fonte: Do Autor.

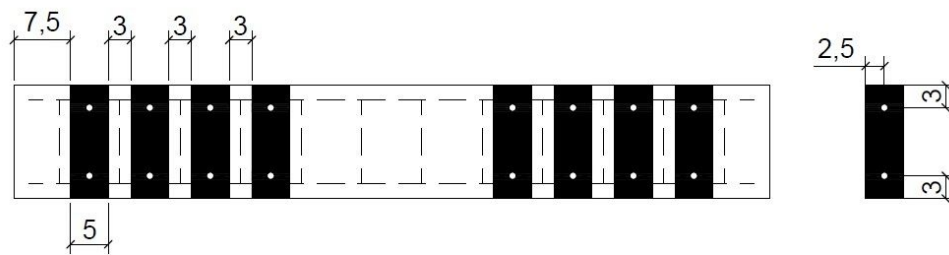
### 3.7.2 Reforço com Chapa de aço colada

O reforço com chapas foi feito com chapas de 5cm x 15cm, com 2,65mm de espessura, o aço utilizado foi SAE 1070, que tem resistência à tração de 420 MPa.

O procedimento para aplicação das chapas de aço é muito semelhante ao de aplicação de fibra de carbono, Soto (2013) destaca que deve ser feito uma pequena abrasão da superfície para aumentar a aderência do adesivo epóxi. Após é aplicado uma camada de adesivo para colagem das placas, que ainda podem contar com o auxílio de dois *parabolts* colocados entre as armaduras longitudinais. Deve-se atentar à limpeza das partes, principalmente das chapas, que geralmente acompanham partes enferrujadas e como são armazenadas com óleo, devem ser limpas com devida importância.

Na Figura 27 fica exemplificado como foram aplicados os reforços com chapas metálicas.

Figura 27 - Detalhamento de reforço com chapa de aço



Fonte: Do Autor.

Na Figura 28 fica ilustrado a aplicação dos *parabolts* para a melhor fixação da chapa metálica nos vigas, estes *parabolts* possuem 6 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento. Para a aplicação dos mesmos, a viga é perfurada com uma broca de 6 mm de diâmetro, após o *parabolt* é introduzido com o auxílio de uma marreta de 1 kg.

Figura 28 - *Parabolts* fixados na VRCM



Fonte: Do Autor.

Posterior a aplicação da fixação mecânica, foram aplicadas as chapas metálicas com resina epóxi. Após a colagem da chapa com resina, foi aplicado uma fina camada de resina sobre as chapas para proteção contra ferrugem. A Figura 29 mostra a VRCM com o reforço finalizado.

Figura 29 - VRFC com reforço finalizado



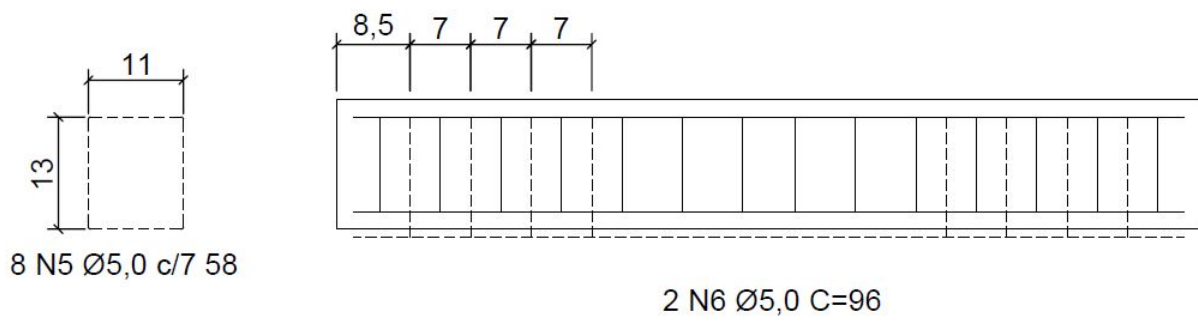
Fonte: Do Autor.

### 3.7.3 Reforço com Estribos com argamassa

Para o reforço das duas vigas com estribos e argamassa de alto desempenho, assim como nos outros métodos é imprescindível a limpeza prévia das vigas com um leve apicoamento e limpeza das impurezas geradas durante o processo.

Posterior a limpeza foi feito uma armadura externa, sendo a armadura transversal com aço de 5mm de diâmetro (N5) com espaçamento de 7cm, e como complemento longitudinal necessário para amarração dos estribos foi utilizado aço com diâmetro de 5mm (N6). A Figura 30 mostra como fica o conjunto entre a armadura original e a armadura de reforço.

Figura 30 - Detalhamento de reforço com estribo argamassado



Fonte: Do Autor.



Para a montagem das armaduras complementares, se fez necessário a transposição da peça com uma broca de 6 mm de diâmetro, o suficiente para passar a barra de aço de 5 mm que compõem os novos estribos. A Figura 31 traz a VREA após ser perfurada.

Figura 31 - VREA após ser perfurada

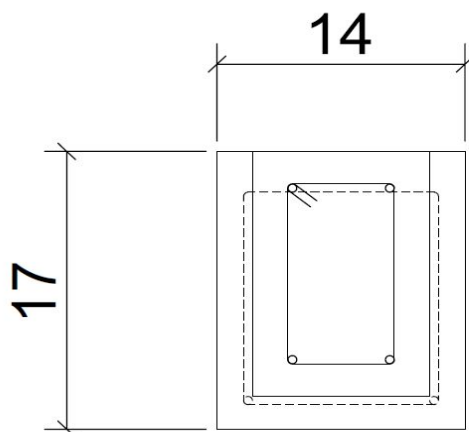


Fonte: Do Autor.

A argamassa de alto desempenho que compôs a nova seção das peças tem seu traço proposto por Vaske et al. (2008), sendo: 1:3:0,1:0,45 (cimento; agregado miúdo; sílica ativa; relação água/aglomerante).

As vigas de seção 10cm x 15cm, após o reforço, tiveram sua seção aumentada para 14cm x 17cm, como mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Detalhamento da seção da viga após reforço



Fonte: Do Autor.

A seguir, na Figura 33 observa-se a VREA com a armadura de reforço finalizada, pronta para receber a argamassa de alto desempenho.

Figura 33 - VREA com armadura de reforço



Fonte: Do Autor.

### 3.8 Ruptura

Esta etapa foi realizada 14 dias após a realização dos reforços, para que haja tempo suficiente para a cura dos reforços, em específico para os estribos com argamassa, que demandam um tempo maior em relação aos outros dois em análise.

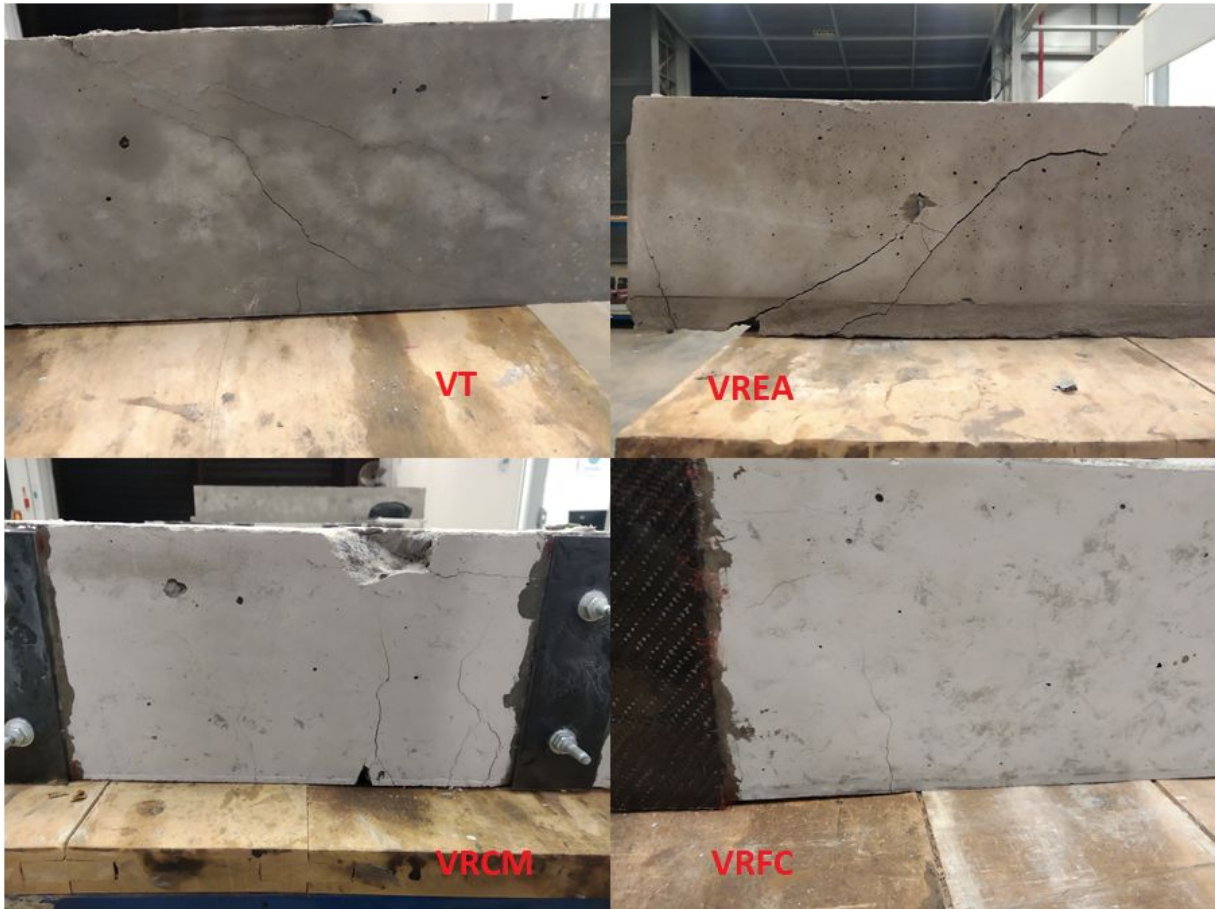
As vigas novamente foram submetidas ao ensaio mecânico de flexão a quatro pontos, mas desta vez, são carregadas até atingirem sua ruína, ELU.

Todos os grupos de vigas foram ensaiados nesta etapa, sendo as Vigas Testemunho (VT), Vigas Reforçadas com Estribos Argamassados (VREA), Vigas Reforçada com Chapa Metálica (VRCM) e Vigas Reforçada com Fibra de Carbono (VRFC). Durante o ensaio, a prensa hidráulica Emic 200Plus é operada de forma manual com velocidade constante de 4mm/mim até o ponto de ruína das peças, este ponto é observado quando o mostrador do equipamento demonstra valores crescentes quanto ao deslocamento e valores decrescentes quanto ao carregamento.



A Figura 34 demonstra seções das vigas dos grupos VT, VREA, VRCM e VRFC após finalizado o ensaio.

Figura 34 - Detalhamento da seção da viga após reforço



Fonte: Do Autor.

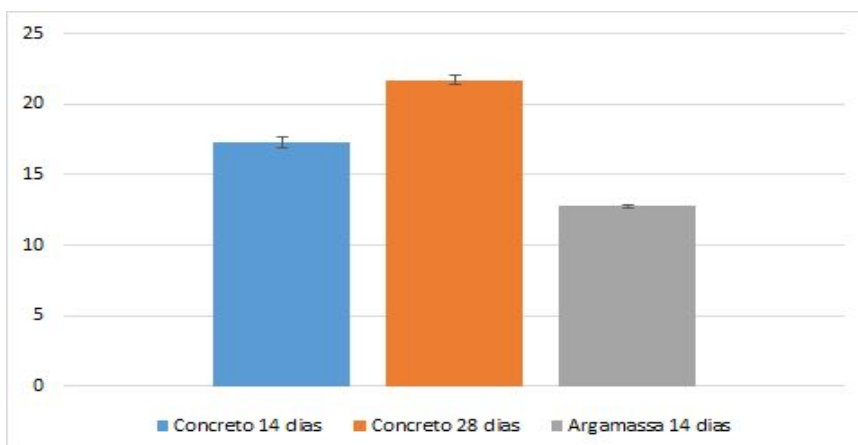
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados todos os resultados coletados durante a pesquisa, desde valores referentes aos corpos de prova de argamassa e concreto ensaiados à compressão, até os resultados dos quatro grupos de vigas ao ensaio de flexão a quatro pontos.

### 4.1 Resultados de resistência à compressão do concreto/argamassa

A Figura 35 ilustra o gráfico com as resistências e desvio padrão das amostras de corpos de prova (CP) de concreto e argamassa, no Apêndice A e B encontram-se os dados do ensaio de compressão na íntegra.

Figura 35 - Valores de resistência a compressão do concreto e argamassa



Fonte: Do Autor.

O concreto utilizado teve seus corpos de provas ensaiados à compressão aos 14 e 28 dias de idade, foram ensaiados 5 CP para cada idade. Durante os ensaios é notável o ganho de resistência do concreto com o avanço de sua idade, como o esperado para um concreto confeccionado com CP-IV.

Para a argamassa de alto desempenho utilizada no reforço com estribos argamassados, foram 3 corpos de prova ensaiados aos 14 dias de idade que apresentaram valores esperados de resistência à compressão. Alvarenga et al. (2013), cita que para uma argamassa sem adição de cal é esperado resistência superior a uma argamassa com adição de cal, principalmente àquelas onde o fator de água cimento é reduzido.

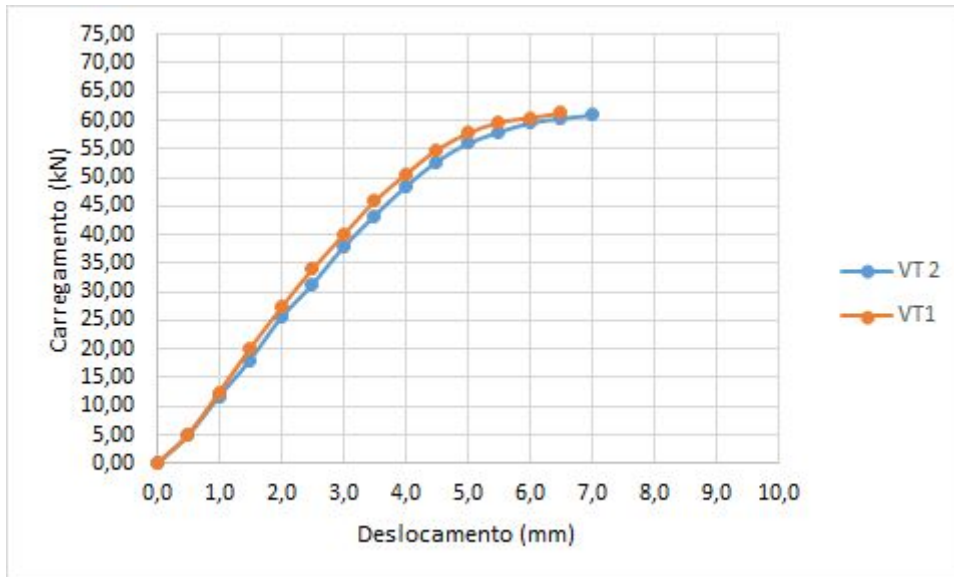
O estudo de Vaske, Campagnolo e Dal Molin (2008), utilizando o mesmo traço de argamassa obtiveram um valor de resistência médio a 28 dias de 45,2 MPa com desvio padrão de 9,0 MPa.

#### **4.2 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Testemunho**

Os ensaios finais que vão levar as peças até seu Estado Limite Último iniciaram pelas peças do grupo testemunho, sendo as vigas VT1 e VT2.

A seguir, na Figura 36 é apresentado um gráfico de força x deslocamento que demonstra o carregamento das peças do grupo testemunho até atingirem seus ELU. Observa-se que até os 4 mm de deslocamento a relação com o carregamento é linear, após isso se tem um decréscimo gradativo no acréscimo de carregamento até atingir a carga máxima, e conseqüentemente, a ruína.

Figura 36 - Gráfico força x deslocamento do Grupo Testemunho



Fonte: Do Autor.

A peça VT1 logo começou a apresentar fissuras típicas do esforço cisalhante, estas fissuras possuem inclinação em torno de  $45^\circ$ , surgindo entre os apoios superiores e inferiores do equipamento. Seguindo com a carga até a ruptura completa da peça, onde as fissuras se transformaram em trincas e a capacidade resistiva da peça decai a cada décimo de mm avançado pelo equipamento, o valor máximo de carga atingido pela VT1 foi de 61,30 kN com uma deformação de 6,5mm.

A viga de testemunho VT2, tendo seu ensaio nos mesmos parâmetros da peça anterior, apresentou comportamento semelhante, iniciando com fissuras oriundas entre os apoios características de cisalhamento, que acabaram por evoluir para trincas, onde, logo em seguida atingiu seu Estado Limite Último, com deslocamento de 7,0mm e carregamento máximo de 61,00 kN.

No estudo de Battisti (2017), o grupo testemunho dimensionado para atingir o ELU devido ao esforço de cisalhamento, demonstrou comportamento semelhante às peças VT1 e VT2, e, segundo o autor, o grupo ensaiado apresentou uma menor tendência à linearidade.

A Figura 37 mostra as vigas do grupo testemunho após atingirem a ruína, nas imagens fica explícito a causa da ruína, as trincas oriundas do cisalhamento apareceram em ambas as extremidades das amostras, com ângulo próximo a  $45^\circ$  entre os apoios do equipamento, assim como nos ensaios de Battisti (2017).

Figura 37 - Grupo VT após ensaio de flexão até seu ELU



Fonte: Do Autor.

#### **4.3 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Reforçado com Chapas Metálicas**

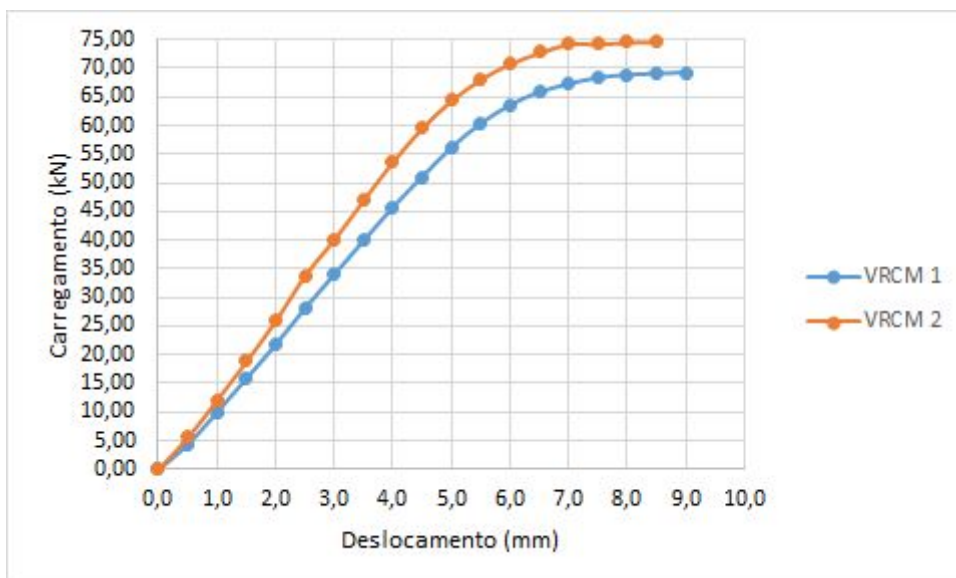
O segundo grupo a passar pelo ensaio de flexão a quatro pontos com o intuito de atingirem seu Estado Limite último, foi o grupo reforçado com chapa metálica.

O corpo de prova VRCM1, durante o ensaio, apresentou fissuras por flexão na porção central inferior da viga, além de fissuras por cisalhamento na extremidade direita que podem ser observadas entre as áreas com chapa metálica, que acabaram evoluindo para trincas conforme era adicionado carga. A carga máxima suportada para esta amostra foi de 69,20 kN com um deslocamento de 9mm.

A viga VRCM2 teve um comportamento um pouco diferente da VRCM1. Esta peça não apresentou fissuras por cisalhamento, na reta final do ensaio, começaram a surgir fissuras por flexão, que rapidamente evoluíram para trincas, inclusive na seção comprimida ocorreu deslocamento de seção de concreto. Logo após, a peça entrou em ruína, com a carga máxima de 74,70 kN e com 8,5mm de deslocamento.

Soto (2013), após ensaiar suas amostras, frisa que há uma mudança na relação de força x deslocamento, esta mudança é o aumento da linearidade em relação ao grupo testemunho, o que significa que o reforço atuou juntamente com a armadura da viga promovendo uma maior resistência até o ELS. A Figura 38 traz o gráfico de força x deslocamento para o grupo de vigas reforçadas com chapas metálicas.

Figura 38 - Gráfico força x deslocamento do Grupo Reforçado com Chapas Metálicas



Fonte: Do Autor.

A Figura 39 mostra as manifestações patológicas originadas durante os ensaios de VRCM1 e VRCM2, onde é possível ver a eficácia do reforço, que conseguiu surtir o esforço cisalhante fazendo que as peças comesçassem a sofrer com manifestações patológicas originadas pelos esforços de flexão. Ainda houve



pequenos pontos com fissuras por cisalhamento que ocorreram entre as chapas metálicas de reforço.

Figura 39 - Grupo VRCM após ensaio de flexão até seu ELU



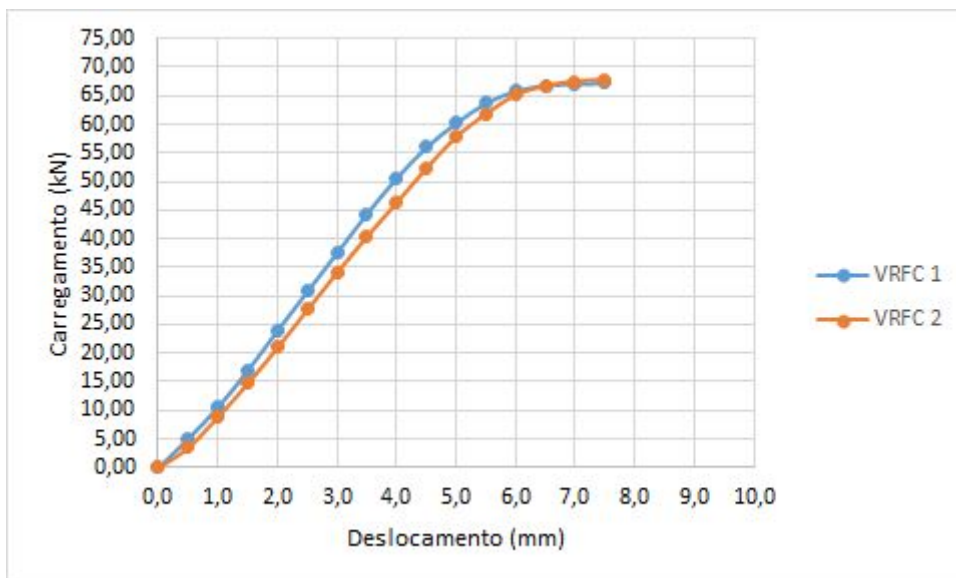
Fonte: Do Autor.

#### 4.4 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Reforçado com Fibra de Carbono

Dando seguimento aos ensaios, foram ensaiadas as vigas reforçadas com fibra de carbono. Para estas vigas, bem como todas anteriormente, a prensa manteve velocidade de avanço constante de 4mm/mim.

Na Figura 40 é demonstrado o gráfico de força x deslocamento para o grupo VRFC, onde se observa um comportamento linear até cerca de 6 mm de deslocamento.

Figura 40 - Gráfico força x deslocamento do Grupo Reforçado com Fibra de Carbono



Fonte: Do Autor.

A VRFC1 é submetida ao ensaio, e acometida novamente pelo esforço de cisalhamento em sua extremidade direita, onde aos poucos as fissuras surgiram e evoluíram para trincas, essas trincas se concentraram nas áreas entre os reforços. As placas de fibra de carbono descolaram da viga arrancando seções de concreto. Também surgiram fissuras por flexão na região central da peça, e na parte superior iniciou o deslocamento. A carga máxima para a peça foi de 67,20 kN com deslocamento de 7,5mm.

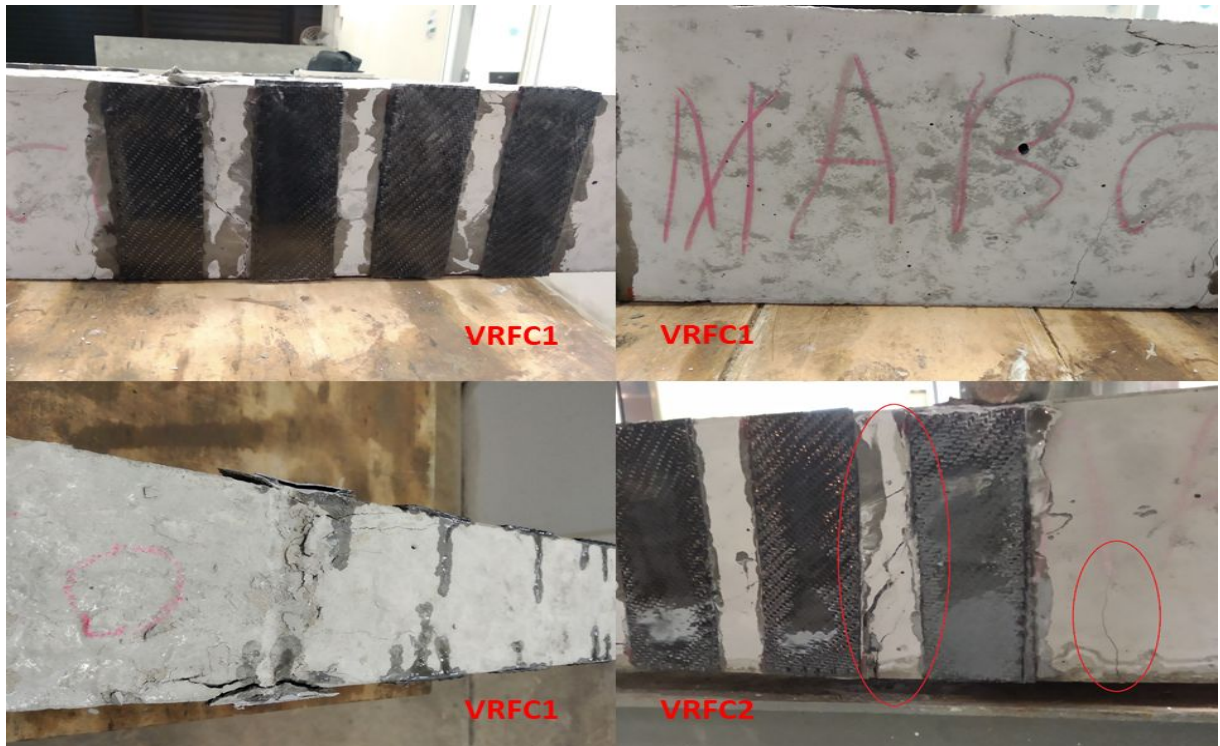
Para a viga VRFC2, o comportamento durante o ensaio foi semelhante a viga anterior, em sua região central surgiram fissuras por flexão. Na extremidade esquerda acabaram por surgir novas trincas por cisalhamento, ressaltando que as trincas surgiram entre os reforços, não passando pela seção da viga com aplicação de fibra de carbono. Para a VRFC2, o pico de carga se deu aos 7,5mm de deslocamento, com um carregamento de 67,8 kN.

A Figura 41 traz as manifestações patológicas ocorridas nas peças VRFC2 e VRFC2 para o ensaio de flexão a quatro pontos até sua ruína. Em ambas as amostras ensaiadas surgiram fissuras por flexão na parte inferior da viga que



rapidamente evoluíram para trincas. Tanto a VRFC1 quanto a VRFC2, pouco antes de sua ruína, começaram a apresentar fissuras na porção comprimida. Na VRFC2, a imagem mostra o deslocamento do reforço juntamente com seção de concreto da amostra, além de fissuras por cisalhamento entre os reforços de fibra de carbono.

Figura 41 - Grupo VRFC após ensaio de flexão até seu ELU



Fonte: Do Autor.

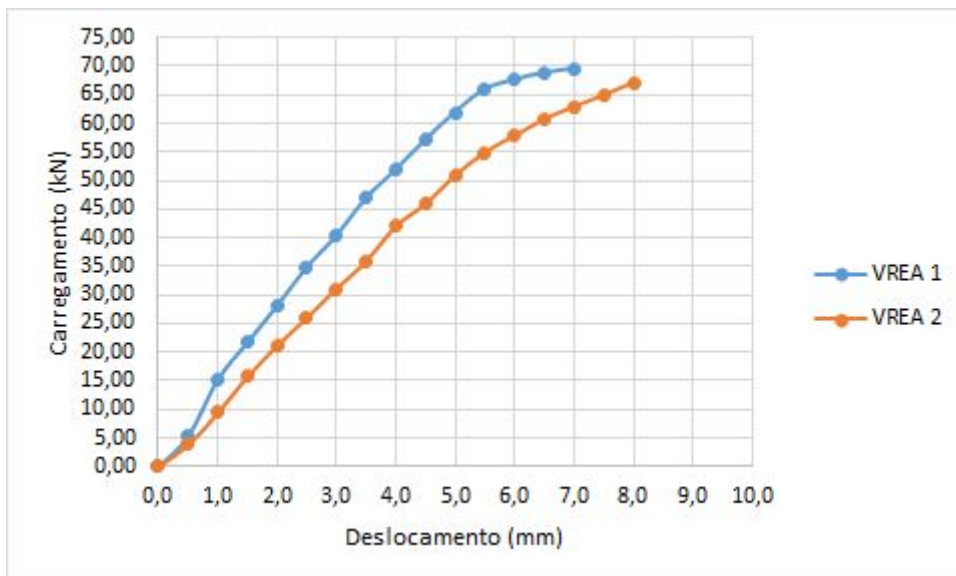
#### 4.5 Resultados de flexão a 4 pontos do Grupo Reforçado com Estribo Argamassado

As vigas reforçadas com estribos argamassados (VREA) foram o último grupo a passar pelo ensaio mecânico de flexão a quatro pontos devido à necessidade de ajuste na altura do equipamento, sendo as peças marcadas como VREA1 e VREA2.

Na Figura 42, no gráfico de força x deslocamento, que demonstra o carregamento das peças do grupo reforçado com estribos argamassados até atingirem a ruína, observa-se que até os 5,5 mm de deslocamento a relação com o

carregamento tem tendência linear, a após isso, se tem um a redução gradativa no acréscimo do carregamento até atingir a carga máxima e posterior ruína.

Figura 42 - Gráfico força x deslocamento do Grupo Reforçado com Estribos Argamassados



Fonte: Do Autor.

No gráfico apresentado, é possível observar o aumento da linearidade na relação força x deslocamento, comportamento também observado por Soto (2013) em suas amostras reforçadas por encamisamento. As vigas ensaiadas pelo referido autor mantiveram comportamento linear até próximo do ELU, comportamento que também pode ser observado aqui neste estudo.

O corpo de prova VREA1 manteve sua linearidade na relação carga x deslocamento até por volta dos 65,9 kN de carga e 5,5 mm de deslocamento, onde já apresentava trincas significativas por cisalhamento em sua extremidade esquerda. Na extremidade direita surgiram fissuras por cisalhamento, além de fissuras por flexão no centro da peça, após isso, ainda se teve um pequeno acréscimo ao carregamento até a peça atingir o ELU. A carga máxima suportada foi de 69,40 kN com um deslocamento de 7 mm.

A peça VREA2 manteve a mesma proporção de carga x deslocamento que a peça VREA1, porém com valores um pouco inferiores. Seguindo o mesmo padrão

dos ensaios anteriores, o corpo de prova começou a apresentar fissuras por cisalhamento durante o ensaio, que evoluíram para trincas. Nesta peça houve descolamento entre o concreto e a argamassa de alto desempenho na extremidade que apresentou a patologia mais severa, seu carregamento máximo foi de 67,10 kN e 8,0 mm.

A Figura 43 traz as seções comprometidas pelo esforço cisalhante nas duas amostras do grupo reforçado com estribo argamassado. Na imagem referente a VREA1 é notável a trinca em sua extremidade esquerda devido ao cisalhamento entre os apoios da prensa juntamente com uma fissura por compressão ao centro da peça. Para a VREA2, na extremidade esquerda observou-se o descolamento entre a argamassa de reforço e o concreto, na outra extremidade ocorreram graves trincas por cisalhamento.

Figura 43 - Grupo VREA após ensaio de flexão até seu ELU



Fonte: Do Autor.

#### 4.6 Comparação dos resultados dos grupos de vigas

Comparando o resultado dos grupos expostos ao ensaio de flexão a quatro pontos, percebe-se que todos os reforços utilizados no estudo foram capazes de recuperar as vigas de concreto armado comprometidas por cisalhamento.

Soto (2013), em seus estudos, também obteve resultados satisfatório aplicando chapas metálicas com o auxílio de *parabolts*, o incremento de resistência em suas vigas de estudo comprometidas ao cisalhamento ficou na casa dos 6%.

A Tabela 6 traz o ganho na resistência em porcentagem, entre o grupo reforçado com chapa metálica em comparação com o grupo testemunho, que para o ELS ficou próximo a 30%. Em relação ao ELU, houve acréscimo de resistência inferior, ficando um pouco abaixo de 20%.

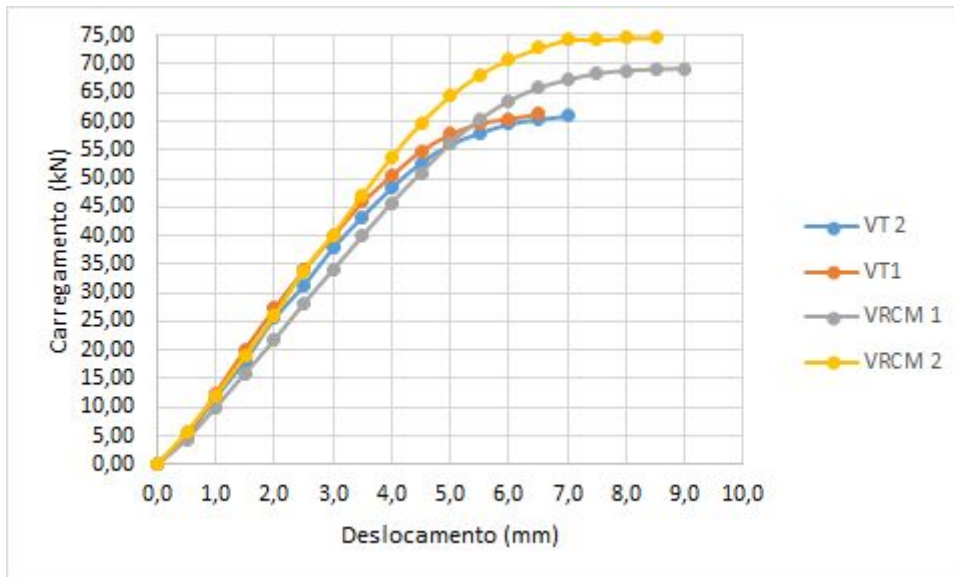
Tabela 6 - Comparação entre VRCM e VT.

Limite	Amostra	Deslocamento (mm)	Carga (KN)	Ganho de Resistência (%)
ELS	Média Grupo VT	4,00	49,5	0,0
	Média Grupo VRCM	5,50	64,25	29,8
ELU	Média Grupo VT	6,75	61,15	0,0
	Média Grupo VRCM	8,75	71,95	17,7

Fonte: Do Autor.

A Figura 44 mostra a maior linearidade obtida com o reforço de chapas metálicas nas vigas de concreto armado.

Figura 44 - Correlação entre força x deslocamento de VT e VRCM



Fonte: Do Autor.

Para as vigas VRFC, em relação às VT, a exemplo da comparação anterior com as VRCM, houve um acréscimo significativo na resistência em relação ao ELS e um aumento inferior em relação ao ELU, conforme a Tabela 7. Se comparado ao trabalho de Battisti (2017), onde seus reforços ao cisalhamento com fibra de carbono acrescentou 36,4% de desempenho no ELS, valor muito próximo entre os dois estudos. Para o ELU, o ganho de resistência de Battisti foi 44,4%, esse dado teve uma grande discrepância entre os dois trabalhos.

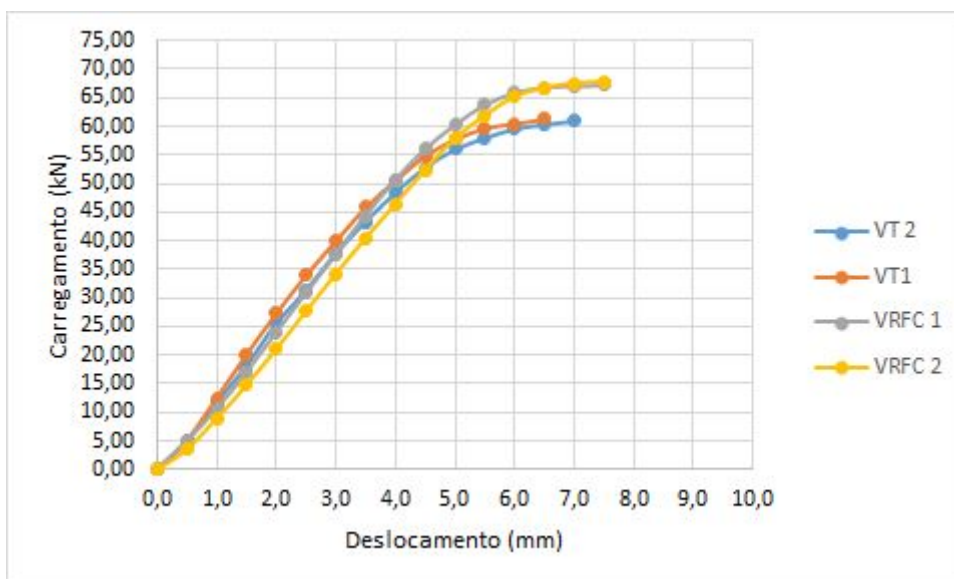
Tabela 7 - Comparação entre VRFC e VT.

Limite	Amostra	Deslocamento (mm)	Carga (KN)	Ganho de Resistência (%)
ELS	Média Grupo VT	4,00	49,5	0,0
	Média Grupo VRFC	6,00	65,45	32,2
ELU	Média Grupo VT	6,75	61,15	0,0
	Média Grupo VRFC	7,50	67,6	10,5

Fonte: Do Autor.

A Figura 45 mostra o acréscimo na linearidade de VRFC sobre VT, a exemplo do que aconteceu com o grupo anterior, a linearidade do ELS se estendeu por um deslocamento maior do que no grupo testemunho.

Figura 45 - Correlação entre força x deslocamento de VT e VRFC



Fonte: Do Autor.

Para o último grupo ensaiado, as vigas VREA foram as que demonstraram um menor desempenho, mesmo assim, cumpriu seu objetivo em recuperar uma viga de concreto armado deteriorada por esforço cisalhante, e ainda trouxe um acréscimo de resistência para o ELS e ELU, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação entre VREA e VT.

Limite	Amostra	Deslocamento (mm)	Carga (KN)	Ganho de Resistência (%)
ELS	Média Grupo VT	4,00	49,5	0,0
	Média Grupo VREA	5,50	60,4	22,0
ELU	Média Grupo VT	6,75	61,15	0,0
	Média Grupo VREA	7,50	68,3	11,7

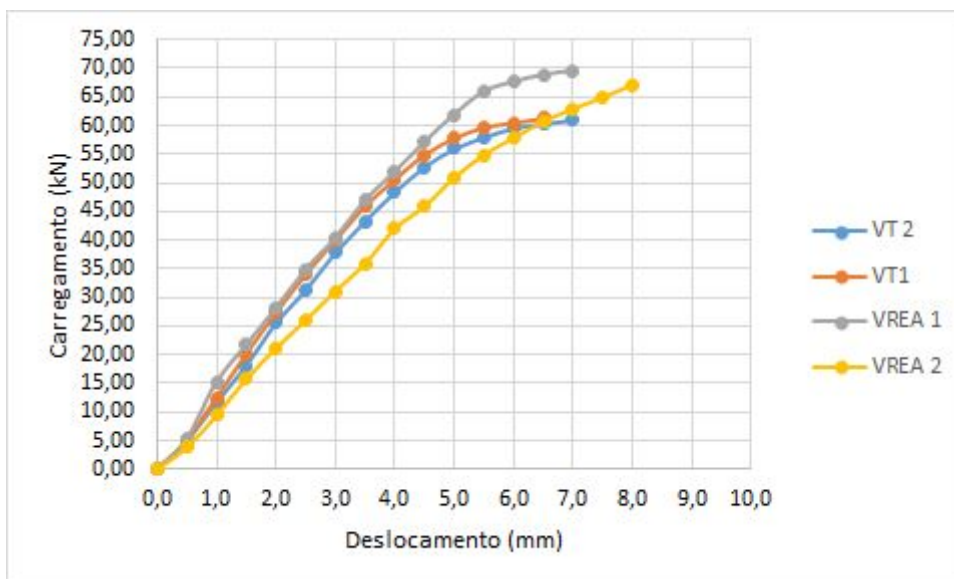
Fonte: Do Autor.



A correlação entre o testemunho e a peça reforçada de Soto (2013) tem padrão muito parecido com a correlação obtida neste estudo, porém, para o valor máximo de ELU, o autor obteve valores muito acima desta pesquisa, com acréscimo de 58% em relação a seu testemunho.

Como todos os reforços até aqui analisados, o reforço com estribos e acréscimo de seção também estenderam a tendência de linearidade da relação de força x deslocamento, o gráfico também mostra que quando a peça começa a apresentar fissuras, logo ela chega ao ELU, que fica mostrado na Figura 46.

Figura 46 - Correlação entre força x deslocamento de VT e VREA.



Fonte: Do Autor.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo teve como principal objetivo reforçar vigas de concreto armado acometidas por esforço cisalhante, fazendo o uso de diferentes métodos de reforço estrutural, realizando o ensaio de flexão a quatro pontos e analisando o ganho de resistência da peça recuperada e seu comportamento.

Após os ensaios, os três métodos de reforço analisados provaram-se eficientes. Com base nos valores obtidos para o ELS das peças, sendo que este é o limite extremo de desempenho para os elementos estruturais. O grupo VRFC se mostrou mais eficiente e o grupo VRCM teve valores próximos, promovendo um aumento de resistência de 32,2% e 29,8%, respectivamente. Com um ganho de resistência 22,0% o grupo VREA também teve desempenho satisfatório quanto ao ELS.

Para o ELU, os ganhos foram menores, sendo 17,7%, 11,7% e 10,5% respectivamente para os grupos VRCM, VREA e VRFC. Este menor ganho de resistência do ELU em comparação ao ELS se deve ao fato que os três reforços deixaram a relação de força x deslocamento das peças com maior linearidade. Assim que as amostras recuperadas começaram a apresentar fissuras, o ELU estava próximo.

Dentre os reforços utilizados, levando em consideração a aplicação *in-loco*, os estribos argamassados demandam uma maior quantidade de trabalho com



perfuração das vigas para passagem de estribos, montagem de formas e lançamento da argamassa. As chapas metálicas e fibra de carbono são muito mais simples de serem aplicadas, podendo ser facilmente aplicados por apenas um profissional, lembrando sempre dos cuidados com a limpeza do substrato para a aplicação dos mesmos.

Espera-se que este estudo sirva como motivação para futuros trabalhos, seja utilizando métodos de análise mais modernos ou mesmo na avaliação de novos métodos de reforço que podem ser comparados com os aqui estudados.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5736 - **Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro, ABNT, 1991.

\_\_\_\_. NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Norma do Mercosul, 2003.

\_\_\_\_. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_. NBR NM-ISO 3310-1 - **Peneiras de Ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

\_\_\_\_. NBR 15900-1 - **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

\_\_\_\_. NBR 16605 - **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

\_\_\_\_. NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Norma do Mercosul, 2006.

\_\_\_\_. NBR NM 52 - Agregado miúdo - **Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Norma do Mercosul, 2009.

ADORNO, Felipe V.; DIAS, Frederico O.; SILVEIRA, João C. de O. **Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. Santa Maria, 2015.

ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Estruturas de concreto armado**. Departamento de estruturas. São Paulo, 2002.

ALVARENGA, Rita de Cássia Silva Sant' Anna. BRANO, Luiz Antonio Melgaço Nunes. MENDES, Victor Roberto Verga. Avaliação de ensaios em argamassas para

uso em pisos e revestimento - Análise comparativa entre normas. **Construindo**, Belo Horizonte, 2013.

ARQUEZ, Ana Paula. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Monografia (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BATTISTI, Fernando. **Recuperação de vigas em concreto armado utilizando polímero reforçado com fibras de carbono**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2017.

BERTON, Júlia Giordani. **Análise do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com adição de materiais pozolânicos submetidas à corrosão**. Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2019.

BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**. Monografia (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BOGGIO, Aldo J. **ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND**. Porto Alegre, 2000.

BRONZE, Ricardo Alves. **Estudo comparativo: uso do sistema de fibras de carbono e sistema convencional para reforço de estruturas de concreto**. Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CAMARGO, Rafaela Garcia. **Estudo de patologia em concreto armado e proposta de soluções: análise de caixa de areia no sistema de tratamento de efluentes em uma cooperativa de laticínios**. Monografia (Graduação), Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2017.

CAMPAGNOLO, João; DAL MOLIN, Denize.; VAZKE, Nei Ricardo. Aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto. **Revista Ambiente Construído**. Vol 8. Porto Alegre, 2008.

CANTARELLI, Rovani Schunke. **Elaboração do manual de operação, uso e manutenção das edificações**. Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

CARMO, Marco Antônio do. **Estudo da deterioração de marquises de concreto armado nas cidades de Uberlândia e Bambuí**. Monografia (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CARVALHO, Tiago Silva de. **Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósito de CFRP**. Monografia (Mestrado), Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

COUTO, João; COUTO, Arminda M. **Importância da revisão dos projectos na redução dos custos de manutenção das construções**. Coimbra, 2007.

COUTO, José A. S.; CARMINATTI, Rafael L.; NUNES, Rogério R. A.; MOURA, Ruan C. A. O concreto como material de construção. **Cadernos de graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**. Sergipe, 2013.

CRISTINA, Jéssica; EMIDIO, João P.; FERREIRA, Joice; LOPES, Marcone. **Resistência característica do concreto à compressão ( $F_{ck}$ ) - CIMENTO - CP II**. Cobenge, Juiz de Fora, 2014.

CUNHA, Danilo L. E. **Análise de fissuração em vigas de concreto armado**. Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

DOLABELA, Gustavo Soares; FERNANDES, Jordane Geraldo Moreira. Falhas devido à falta de compatibilização de projetos: estudo de casos em obras e edificações. **Revista Pensar Engenharia**, 2014.

FARIA, Matheus de; BARRETO, Oliveira. **Características mecânicas de vergalhões de aço auto-revenido**. Monografia (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FREITAS, Camila Freitas dos. **Patologia de estruturas de concreto armado**. Monografia (Graduação), Universidade Federal de Santa Maria, Curso de Engenharia Civil, Santa Maria, 2014.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

HELENE, Paulo R.L. **Manual prático para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

INTECH. **Reforço com fibra de carbono**. 2018. Disponível em: <https://medium.com/@comercial06/refor%C3%A7o-com-fibra-de-carbono-5a8f0dd4fcfd>

LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LAWRENCE, C. B., **Composites for Construction: Structural design with FRP materials**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.

LIMA, Maria Cristina Vidigal de. **Contribuição ao estudo da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas**. São Carlos, 2002.

MACHADO, A. d. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo, PINI, 2002.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo, 2010.

MADUREIRA, E. L.; SIQUEIRA, T. M.; RODRIGUES, E. C. Creep strains on reinforced concrete columns. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. São Paulo, 2013.

MARCELLI, Mauricio. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obra**. São Paulo: Pini, 2007.

MATTHYS, Stijn. **Structural behavior and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement**. Doctoral Thesis, Ghent University, 2000.

MAYR, Luiz Roberto. **Falhas de projeto e erros de execução: uma questão de comunicação**. Monografia (Pós-Graduação), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MENON, Nara Villanova; PADARATZ, Ivo José. Reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se materiais compósitos de PRFC. **REEC Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Universidade Estadual do Maringá, 2014.

MONTANARI, Nicolas; GONÇALVES, Erika P. **Fibras de carbono na construção civil**. Universidade do Vale da Paraíba - UniVap, São José dos Campos, 2016.

MOURA, Michel. **Reforço estrutural em estruturas de concreto armado**. Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

MUCI, Daniel W. S.; NETTO, José R. B.; SILVA, Rodrigo de A. **Sistemas de recuperação de fissuras da alvenaria de vedação: avaliação da capacidade de deformação**. Universidade Federal de Goiás, Curso de Engenharia Civil, Goiânia, 2013.

NBR 5674. **Manutenção de edificações - Procedimentos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. São Paulo: Brookman, 2010.

PACHECO, Jéssika; BILESKY, Pedro; MORAIS, Tereza R.; GRANDO, Fernanda; HELENE, Paulo. **Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto**. IBRACON, São Paulo, 2014.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. **Estruturas do concreto - capítulo 2**. USP - EESC - Departamento de Engenharia de Estruturas, 2004.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. **Estruturas do concreto - capítulo 3**. USP - EESC - Departamento de Engenharia de Estruturas, 2010.

REGANATI, Buno. **Como evitar bicheiras no concreto?** 2019. Disponível em: <https://www.concretousinado.com.br/noticias/bicheiras-concreto/>

RIBEIRO, R. R. J.; DIÓGENES, H. J. F.; NÓBREGA, M. V.; EL DEBS, A. L. H. C. Um estudo das propriedades mecânicas do concreto para fins estruturais preparado em canteiro de obras. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. São Paulo, 2016.

SANTOS, Camila Freitas dos. **Patologia de estruturas de concreto armado**. Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SCHWARTZ, M. M. **Composite materials handbook**. Nova Iorque, 1984.

SERRA, Marcus. SILVA, T. H. L. Fibra de carbono: reforço estrutural em estruturas de concreto armado. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, 2019.

SOTO, Rafael Cavalcante. **Reforço e recuperação de vigas de concreto armado**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SOUZA, C. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1º Edição, Pini, São Paulo, 2009.

SOUZA, Fernando C. de; Vargas, Alexandre. **Análise experimental de reforço com fibra de carbono no combate ao cisalhamento em vigas de concreto armado**. Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, 2016.

TAKATA, Leandro Teixeira. **Aspectos executivos e a qualidade de estruturas em concreto armado: estudo de caso**. Monografia (Pós-Graduação) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

TRINDADE, Diego dos Santos. **Patologia em estruturas de concreto armado.** Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

VITÓRIO, Afonso. **Fundamentos da patologia das estruturas nas perícias de engenharia.** Recife, 2003.

ZUCCHI, Fernando Luiz. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais.** Monografia (Graduação), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Resultados CP de concreto

Corpo de Prova	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
CP 1	197	102	14	17,27
CP 2	194	102	14	18,03
CP 3	193	102	14	17,08
CP 4	193	102	14	17,14
CP 5	194	102	14	17,13
CP 6	193	102	28	21,37
CP 7	195	102	28	22,15
CP 8	194	102	28	21,77
CP 9	194	102	28	21,75
CP 10	195	102	28	21,37

### APÊNDICE B - Resultados CP de argamassa

Corpo de Prova	Área (mm <sup>2</sup> )	Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
CP 1	1600	14	12,59
CP 2	1600	14	12,90
CP 3	1600	14	12,75





**UNIVATES**

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil  
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000  
[www.univates.br](http://www.univates.br) | 0800 7 07 08 09